



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시, 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리, 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지, 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

3차원 수치해석모델을 이용한
셸드TBM 굴착시 막장압에 따른 지반
및 라이닝의 거동 분석



2008년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

조 중 식

공학석사 학위논문

3차원 수치해석모델을 이용한
셸드TBM 굴착시 막장압에 따른 지반
및 라이닝의 거동 분석

지도교수 정 두 회

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2008년 2월

부경대학교 대학원

토목공학과

조 중 식

조중식의 공학석사 학위논문을 인준함

2008년 02월 26일



주 심

정 진 호 인

위 원

이 영 대 인

위 원

정 두 회 인

목 차

	page
표 목 차	i
그 립 목 차	ii
Abstract	iv
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 최근연구동향	2
1.3 연구방법 및 범위	4
제 2 장 쉘드 TBM 소개	5
2.1 쉘드 TBM의 개요	5
2.2 쉘드의 종류와 선정	7
2.2.1 쉘드의 종류	7
2.3 막장안정의 이론	11
2.3.1 토압식 쉘드공법의 막장안정	11
2.3.2 점성토지반에서의 막장안정	12
2.3.3 사질토지반에서의 막장안정	13
2.3.4 각종공법에서의 막장안정	13
2.4 쉘드터널의 지반변위 원인 및 형상	15
2.4.1 쉘드터널의 지반 변위 메커니즘	15
2.4.2 지반변위의 분포	16
2.5 터널에 작용하는 토압결정	17
2.5.1 연직토압	18
2.5.2 수평토압	18
2.6 지반변위의 예측	19

2.6.1	횡방향 침하형태의 예측	21
2.6.2	터널상부의 최대침하량 예측	21
제 3 장	3차원 유한요소법에 의한 지반 및 라이닝 변형 거동	26
3.1	3차원 유한요소 프로그램 모델 검증	26
3.1.1	검토구간 수치예제 해석	26
3.1.2	해석결과	28
3.2	매개변수 연구	29
3.2.1	기본입력자료 구성	30
3.2.2	매개변수의 선정 및 각각의 입력자료	32
3.3	차원 수치해석 모델	33
3.3.1	시공단계별 모델링 과정 소개	33
3.3.2	적용 모델 소개	35
3.4	수치해석 결과	36
3.4.1	지표침하량	37
3.4.2	지중 측방 거동	47
3.4.3	터널 라이닝의 변형 거동	51
제 4 장	결 론	55
	참고문헌	57

표 목 차

	page
표 2.1 쉘드의 분류	7
표 2.2 지반변위의 메커니즘	15
표 2.3 측압계수 및 지반반력계수	19
표 2.4 지반변위해석법의 분류	20
표 2.5 V , K , n 의 상관계수 (Attlewell 방법)	24
표 2.6 점성토 지반에서의 침하 곡선에 관한 정수	25
표 3.1 적용 토질정수	27
표 3.2 기본 해석 케이스	30
표 3.3 쉘드 지보재 입력 자료	31
표 3.4 해석조건	32
표 3.5 시공단계	36
표 3.6 특정 막장압을 기준으로 그라우트압에 따른 침하량 비교	38
표 3.7 특정 막장압을 기준으로 그라우트압에 따른 변위 비교	41
표 3.8 특정 그라우트압을 기준으로 막장압에 따른 변위 비교	42
표 3.9 그라우트압에 따른 수평변위(터널측벽부에서 4.0 m이격지점)	50
표 3.10 라이닝 설치 이후 시공단계별 라이닝 천단부 변위량	52
표 3.11 라이닝 설치 이후 시공단계별 라이닝 바닥부 변위량	54

그 립 목 차

	page
그림 2.1 쉘드 TBM 장비	6
그림 2.2 쉘드 TBM의 시공순서도	6
그림 2.3 쉘드기 굴착시 지반침하 원인	15
그림 2.4 이완토압	18
그림 3.1 쉘드터널 유한요소망	27
그림 3.2 횡방향 침하곡선	28
그림 3.3 종방향 침하곡선	29
그림 3.4 쉘드터널 굴착 모델링	34
그림 3.5 유한요소망과 변위 관측위치	35
그림 3.6 종방향 침하곡선(막장압 10 kN/m ² 작용시)	38
그림 3.7 종방향 침하곡선(막장압 20 kN/m ² 작용시)	39
그림 3.8 종방향 침하곡선(막장압 45 kN/m ² 작용시)	39
그림 3.9 종방향 침하곡선(막장압 75 kN/m ² 작용시)	40
그림 3.10 종방향 침하곡선(막장압 120 kN/m ² 작용시)	40
그림 3.11 종방향 침하곡선(그라우트압 120 kN/m ² 작용시)	43
그림 3.12 종방향 침하곡선(그라우트압 140 kN/m ² 작용시)	43
그림 3.13 종방향 침하곡선(그라우트압 200 kN/m ² 작용시)	44
그림 3.14 종방향 침하곡선(그라우트압 250 kN/m ² 작용시)	44
그림 3.15 횡방향 침하곡선	45
그림 3.16 횡방향 침하곡선(그라우트압 140 kN/m ² 작용시)	46
그림 3.17 수평변위 해석구간	47
그림 3.18 수평변위(시공 3단계-쉘드막장면 접근시)	48
그림 3.19 수평변위(시공 8단계-그라우트압 접근시)	49

그림 3.20 그라우트압 주입시 수평변위(막장압 10 kN/m ² 작용시)	51
그림 3.21 시공단계별 천단부 변위(그라우트압 120 kN/m ² 작용시)	53
그림 3.22 시공단계별 바닥부 변위(그라우트압 120 kN/m ² 작용시)	54



Analysis of Ground Movements and Lining Segment in Shield TBM Based on Three Dimensional Finite Element Method

Joong-Sik Cho

*Department of Civil Engineering, Graduate School
Pukyong National University*

Abstract

In tunnelling the enginner is challenged by the save and economic design fo the tunnel lining. Simplificaitons of the complex spatial structure and the non-liear material behaviour in analytical procedures often lead to overdimensioned solutions. Numerical computation in order to simulate the three-dimensional geometry and the interaction between lining and soil in applied to achieve economic design results. In this study a three-dimensional numerical model is used by the finite-element program MIDAS-GTS to simulate the tunnel driving with a shield machine. As basis for the numerical model the typical characteristics of an EPB-Shield (Earth Pressure Balanced Shield) was used. With the numerical model several calculations have been carried out. Base on the above numerical model, this paper focuses on the ground surface movements, particularly the transverse and longitudinal settlement profiles during shield tunnel construction. With settlement calculations especially the influence of the injection pressure of the gap backfilling and the face pressure was investigated.

Keywords : Shield-driven tunneling, Construction process simulation, Three-dimensional numerical model, Settlement profile

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

산업혁명 이후 도시의 급속한 발달로 인해 인구의 집중과 함께 도시가 팽창되면서, 많은 도시시설물들이 지상에서 건설되었다. 최근의 도시구조는 지상구조물의 밀집화로 인하여 지하공간의 필요성이 대두되고 있으며, 지하철 건설, 전력구 및 하수관로 등 지하공간 활용이 활발해졌다. 이에 따라 도시에 서의 터널 공법이 많이 채택되게 되었으며, 고도의 터널기술들이 발전되고 있다. 개착식 공법이 부적합한 대도시나 주요시설물의 근법시공이 요구되는 토사지반에 적용되는 대표적인 터널공법인 쉘드 TBM의 사용이 많이 증가되고 있으며 국내에서도 점점 사용이 증가하는 추세이다. 그러므로 터널의 설계와 시공현장에서의 적절한 안전관리 및 기존 구조물의 안전을 위하여 터널 굴진에 의해 발생된 지반변형을 정확하게 예측할 수 있어야 한다.

수십년전까지는 쉘드공법에 의해 주변구조물에 피해가 발생하는 것이 사회문제가 되었던 적이 있었으나 그 후의 밀폐식 쉘드기의 개발, 동시 취채움 주입장비의 도입 등 기술의 진보에 의해 피해는 감소하였지만 한편으로는 더욱 연약한 지반을 대상으로 하지 않으면 안되거나 지중구조물의 증가와 동시에 기존 구조물에 접근하여 시공하지 않으면 안되는 등 오히려 이전보다 힘든 환경조건하에서의 시공이 부득이한 경우도 많아졌다. 따라서, 지반 변위현상을 파악하여 그 정도를 예측하는 것이 공사를 진행해 가는 데는 극히 중요한 일이며 근접구조물에서 영향을 사전에 파악하여 적절한 대책공법을 입안하며, 계측결과로부터 시공의 불량을 판정하여 시공방법을 개선하는 것이 필요하다.

국내에서는 쉘드 TBM의 도입이 아직까지는 초기단계로 적용경험이 부족하여 설계 및 시공에 많은 어려움과 시행착오가 발생하고 있다. 이로 인하여

외국에서의 시공된 현장의 지반변위보다 많은 차이를 보이고 있다. 국내 시공사례 분석 등에 관한 연구를 통하여 쉘드 TBM의 설계 및 시공 기술의 향상이 요구되고 있다. 따라서 지하에서 터널을 굴진 할 때 굴진으로 인한 주변지반의 변위를 간편하고 정확하게 예측할 수 있는 방법이 필요하다.

본 연구에서는 3차원 유한요소 모델을 이용하여 토압식 쉘드 TBM 적용한 터널 굴진에 의해 발생한 지반변위 및 라이닝 거동을 분석하여 시공단계에 따른 지반변위의 원인을 도출함으로써 차후 쉘드 TBM의 터널설계 및 시공기술의 개선을 위한 기본 자료를 제시하고자 한다.

1.2 최근의 연구동향

쉘드 TBM은 연약한 토사나 지하수면 아래의 굴착 등 연약한 지반을 굴착 시 쉘드를 이용하여 굴착면을 굴착 즉시 안정시키면서 공동을 복공하고 굴진을 반복하는 공법으로 1852년 영국의 M. I. Brunel이 영국 런던의 테임즈강을 횡단하는 도로터널에 정방향 단면의 쉘드를 최초로 이용하였다.

지하에서 터널을 굴진 할 때 생각해야 할 문제중 하나는 지반 내에 이미 존재하는 응력 즉, 초기응력을 어떻게 결정할 것인가이다. Terzaghi & Richart(1952)가 지반에서 횡방향의 응력은 같고 횡방향의 변형은 '0'이라고 초기응력개념을 발표한 이후, 1960년대까지는 이 개념들이 그대로 사용되었다. Talobre(1957)는 시간에 의존한 변형을 수반하는 큰 응력변화를 받는 암반이 그 응력변화에 견디지 못하게 되면 수평응력과 연직응력이 같아질 수 있다는 Heim(1912)의 법칙을 발표하였고, 이 법칙을 이용하여 1 km 이상의 깊은 지점에서의 수평응력을 구할 수 있었다.

터널에서의 침하예측은 1969년 Peck에 의해 경험적 방법으로 지표침하의 형상을 정규 분포곡선으로 도식화하고 지질상태와 지하수 조건을 고려하여 터

널 깊이와 침하 폭과의 상관관계를 도표로 제시함으로써 지반변위에 대한 연구가 폭넓게 진행되었다. 1977년 Hanya는 지하철도용으로 건설된 쉘드 터널에 관한 실측치를 정리하여 최대침하량을 예측하는 자료를 제공하였으며, 1981년 Attewell과 O'Reilly-New(1982)는 지표면의 최대침하량을 Peck이 제시한 가우스 정규분포곡선을 기본으로 침하 곡선을 개선하여 최대 지표침하량을 구하는 식을 제시하였다. 또한, Mori(1980)는 쉘드기가 막장을 통과한 직후 테일 보이드(tail void)가 발생함으로써 응력해방에 의한 지반의 전단 변형율의 분포를 유한요소 해석방법으로 도식화하였으며, Kasali와 Clough(1983)는 3차원 유한요소 해석방법으로 병행 터널 시공 및 다양한 토질의 지반에 대한 지표면 침하량을 예측하는 등 유한요소 해석기법을 발전시켰다. Nakayama(1988)와 Yamamoto(1989)는 경질지반의 밀폐식 쉘드에서 테일 보이드에서의 응력해방율을 현장계측 자료로부터 검토하고 계산식을 제시하여 2차원 유한요소 해석방법으로 간단하게 지표침하량을 연구하는 등 터널 시공에 따른 새로운 연구들이 활발히 진행 중이다.

최근에는 컴퓨터의 발전에 따라 Associated Field Method, 유한요소법, 유한차분법, 경계적분법, Distinctive Element Method 등의 수치해석법이 터널 굴진에 따른 지반변위를 파악하는데 사용되고 있으나 이러한 수치해석법은 Parameter Study에 매우 큰 성과가 있지만 정량적인 예측에는 비교적 만족할 만한 결과를 얻지 못하고 있다. 이는 대부분의 지반특성들이 단순화되고 큰 전단변위를 발생시키지 못하며 또한 3차원 해석에는 시간과 경비가 많이들며 터널 주변지반의 각 부위에서 발생하는 여러 가지 응력경로를 동시에 정확히 취급하기가 어렵기 때문이다.

아직까지 국내에서는 지반형태나 굴착방법에 따른 지반변위의 크기와 형태를 정량적으로 제시하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 국내에서 시공중인 쉘드터널공법에 관한 현황분석을 실시하고 계측자료를 분석하여 터널굴진에 따른 지반변위를 미리 예측하고, 지반변위의 원인을 규명함으로써 지반변위를 최

소한 억제할 수 있는 대책을 제시하는 것이 본 연구의 주된 목적이다.

1.3 연구방법 및 범위

본 연구는 문헌조사를 통해 쉘드 TBM의 이론을 정리하고 쉘드 TBM 굴착 기종, 지반조건, 뒤통채움 주입방법 등과 같은 지반변위와 밀접한 상관관계를 가지는 제반사항 등을 검토하였으며, 쉘드 TBM 굴진과정을 3차원 수치해석기법으로 모사하면서 지반의 변위 및 라이닝의 거동을 분석하였다.

지반변위를 예측할 수 있는 많은 방법이 제안되고 해석 프로그램도 많이 개발되고, 실제 쉘드굴진에 의해 발생하는 모든 복합적인 요소들을 고려할 수 있는 상황에 접어들었다. 그러나 현장계측으로 도출된 여러 가지 복합적인 요소가 작용하는 실제 지반의 계측결과치를 수치해석으로 정확하게 예측하기는 많은 어려움이 따른다. 그래서 쉘드 TBM 굴진에 따른 변위를 3차원 수치해석으로 예측하여 계측데이터와 비교하는 연구가 활발히 수행되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 영국의 시공현장의 계측치와 비교하여 검증된 3차원 유한요소 프로그램을 이용하여 도심지 저토포구간에서의 쉘드 TBM 굴진시 막장압과 테일보이드 뒤통채움 그라우트 주입압 등의 시공하중과 지반변위의 관계를 고찰하였다.

제 2 장 쉴드 TBM 소개

2.1 쉴드 TBM의 개요

쉴드 TBM은 그림 2.1과 같은 강재 원통형의 쉴드기를 수직 작업구 내로 투입시켜 전방의 커터 헤드를 회전시키면서 지반을 굴착하고, 막장면은 각종 보조공법(압기, 약액주입)으로 붕괴를 방지하면서 쉴드기 후방에 세그먼트를 설치하는 것을 반복해가면서 터널을 굴착하는 공법을 말한다. 이 공법은 점토, 모래, 자갈 등을 포함하는 연약지반에서의 도시기반시설을 위한 지하공간(상하수도, 전기, 통신선로, 지하철도 등)의 확보를 위해 주로 적용하고 있는데, 종래 개착식 공법으로 시공시 발생하는 각종 소음 및 진동 등의 건설공해와 교통장애 등의 문제점을 최소화하기 위해 개발된 공법이다.

쉴드 TBM의 시공순서는 다음과 같고, 이를 도시화하면 그림 2.2와 같다.

- 1) 터널 외형 단면보다 약간 큰 단면을 가진 원통형의 강재를 지반에 밀어 넣어 토사의 붕괴를 방지하면서 전방 커터 헤드는 암반과 토사를 공시에 굴착하여 배니관을 통해 토사를 반출시킨다.
- 2) 굴착 후방에 설치된 세그먼트를 반력대로 사용, 유압잭을 작동시켜 전방으로 굴진하며 이렉터로 세그먼트를 조립한다.
- 3) 세그먼트와 굴착면 사이 공극은 뒤채움 그라우트재로 즉시 충전하여 지반의 붕괴와 침하를 방지한다.

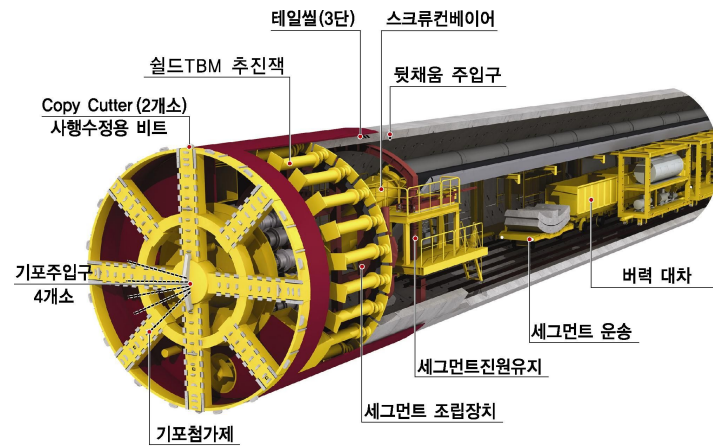


그림 2.1 쉴드 TBM 장비

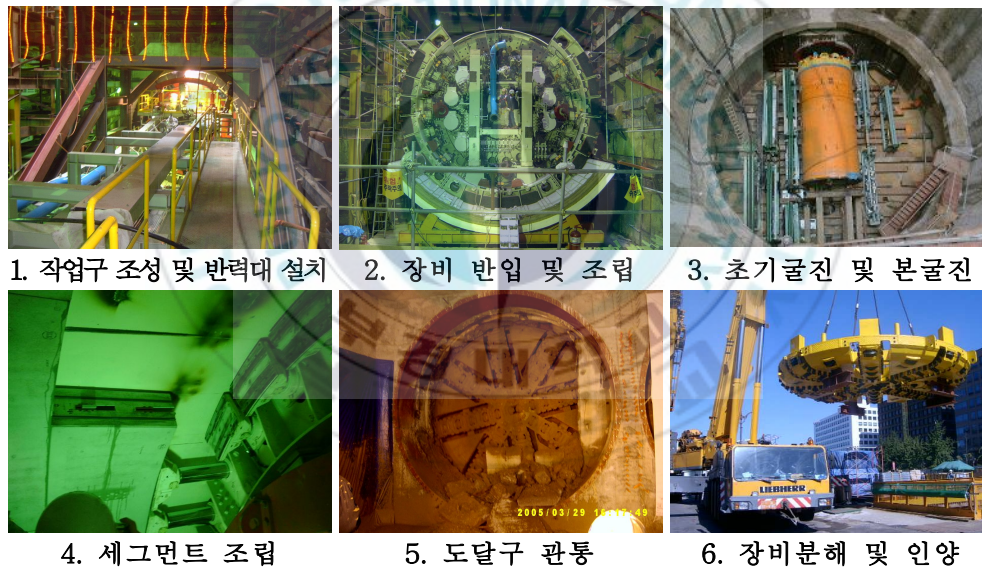


그림 2.2 쉴드 TBM의 시공순서도

2.2 쉼드의 종류와 선정

2.2.1 쉼드의 종류

터널 표준시방서의 쉼드터널의 시공계획 수립지침에 의하면 쉼드는 막장과 작업실을 분리하는 격벽구조에 의해 표 2.1에 표시한 것과 같이 전면 개방형, 부분 개방형 및 밀폐형의 세가지 종류로 구분하고 있다.

표 2.1 쉼드의 분류

쉼 드	전면개방형	수 굴 식	-
		반기계식	-
		기계식	-
	부분개방형	블라인드식	-
	밀 폐 형	이 수 식	-
		토 압 식	토압쉼드
			이토압쉼드

전면 개방형은 격벽이 없고 막장의 대부분이 개방되어 있는 쉼드를 말하고, 굴착형식에 의해 수굴식, 반기계식 및 기계식으로 나뉜다. 이러한 쉼드는 막장의 자립이 유지되는 지반에 적용되므로 자립성이 없는 막장의 경우는 압기공법 등의 보조공법을 병용하여 막장의 붕괴를 막는다. 부분 개방형은 블라인드식 쉼드를 말하며, 격벽의 일부에 개구면적의 조절이 가능한 토사 반출구를 설치한 쉼드이다. 밀폐형은 기계식 쉼드에 격벽을 설치한 것으로서, 굴착한 토사를 막장과 격벽 사이의 챔버 내에 반입하여 이수나 토압에 의해 막장을 유지하도록 충분한 압력을 작용시켜 막장의 안정을 도모한다. 밀폐형은 이수식과 토압식으로 구분된다.

(1) 수굴식 쉴드

수굴식 쉴드는 막장이 자립하는 지반에 적용하며, 자립성이 없는 지반이나 용수가 있는 경우에는 압기, 지반개량 및 지하수위 저하공법과 방형해서 시공한다. 수굴식 쉴드는 전면이 개방되어 있기 때문에 통상은 막장 천정의 붕괴를 막는 이동식 피더 및 텍크 잭, 막장의 붕괴를 막는 잭 등의 흠막이 잭을 이용하여 막장의 붕괴를 막는다. 굴착은 쇼벨, 피크, 브레이크 등의 굴착기를 이용하여 인력으로 행한다. 현재는 굴착단면에 장애물, 자갈·전석 등이 있는 특수조건의 경우에만 채택되고 있어 시공 건수가 극히 드물다.

(2) 반기계식 쉴드

반기계식 쉴드는 유압 쇼벨이나 붐 커터 등의 굴착기, 벨트 컨베이어 등의 적재기 등, 굴착 및 적재에 전문기계를 조합하여 사용하므로 능률적인 시공이 이루어진다. 막장 천정의 함몰방지를 위해 이동식 피더, 하프문 잭은 설치되어 있으나, 굴착기가 장착되기 때문에 페이스 잭 등의 흠막이 잭의 설치가 설치가 곤란하다. 수굴식의 경우와 같이 막장의 자립이 가능한 곳에 채택되며, 압기공법, 지하수위 저하공법, 지반개량 공법 등과 병행하여 시공된다. 최근에는 수굴식 쉴드와 함께 적용 사례가 된다.

(3) 기계식 쉴드

기계식 쉴드는 쉴드 전면에 회전식의 커터 헤드를 장착하여 굴착 능률의 증대를 도모하고 있다. 굴착된 토사는 커터 헤드에 장착된 버킷에 의해 슈트를 통해 컨베이어에 적재된다. 지반의 굴착 및 배토가 연속적으로 이루어지므로 공기 단축이나 작업원의 감소가 가능하다. 그러나 이 쉴드 형태도 자립성이 있는 지반에서만 적용 가능하므로 시공 예가 매우 적은 실정이다.

(4) 블라이드식 쉼드

블라인드식 쉼드는 막장의 약간 후방에 격벽을 두고 그 일부에 개구면적이 조절 가능한 토사 반출구가 설치되어 있다. 쉼드 전면을 지반에 관입·추진하여 관입부의 토사를 유동화시켜 개구부에서 배토한다.

막장의 안정은 개구율을 조절하여 배토의 유입저항을 조절하고, 잭추력과 굴착 토압을 균형시켜 안정시킨다. 자립성이 없고 유동성이 높은 연약 점성토 및 실트질 지반에 적용된다. 모래의 함유율이 높은 경우나 경질 토질에는 맞지 않고, 또 유동지수가 높으면 유동성이 너무 크게 되어 막장의 안정을 유지될 수 없게 될 경우가 있다.

(5) 이수식 쉼드

이수식 쉼드는 기계식 쉼드의 앞쪽에 격벽을 설치하고 면판 커터, 유체 수송을 위한 송배기관, 쉼드기를 추진시키는 쉼드 잭 등이 장착되어 있다. 지상에는 수송된 배니수를 분리하는 이수 처리 플랜트 등을 설치한다.

막장의 안정은 챔버에 이수를 보내어 불투수성의 이막을 만들고 이 이막을 통해서 이수압을 유지시켜 막장에 작용하는 토압 및 수압에 저항한다. 굴착된 토사는 이수와 함께 지상에 유체 수송되어 처리 플랜트에서 토립자와 이수로 분리되며, 분리된 나머지 이수는 품질조정을 하여 막장에 재순환된다. 직접 막장의 지반상태를 눈으로 확인할 수 없기 때문에 일련의 굴진관리 시스템에 의해 집중 관리되고 있다.

일반적으로 처리 플랜트는 지상에 설치되기 때문에 타공법에 비하여 넓은 용지가 필요하므로 시가지 내에서 적용할 때에는 불리한 요소가 된다. 적용 토질은 연약 사질층에서 사력층까지 넓은 범위에 적용되고 있다. 이수식 쉼드는 수년전까지는 토압식 쉼드보다 적용 사례가 많았으나, 도시 내에서 작업 구용 요지 확보가 어려운 점 등으로 인하여 토압식 쉼드보다 적용 현장이 적어지고 있다.

(6) 토압식 쉼드

토압식 쉼드는 기계식 쉼드의 앞쪽에 격벽을 설치하고, 챔버 내와 배토용 스크류 컨베이어에 굴착 토사를 충만시켜 쉼드 잭의 추진력으로 챔버 내의 굴착 토사를 가압하여 막장에 토압을 작용시켜 그 안정을 도모하는 것이다. 그 크류 컨베이어는 축이 부착된 오거, 리본 축이 부착된 오거 등 몇 가지 형식이 있으며 토질조건에 따라 구분하여 쓰여지는데 일반적으로 축이 부착된 오거 형태가 사용된다. 리본 타입은 자갈층 굴착에 쓰여지며 중심에 축이 없기 때문에 큰 자갈의 운반에 유리하다. 한편 축이 부착된 스크류 컨베이어는 압력유지 효과가 높으나, 리본 타입은 중심이 크게 열려 있기 때문에 압력유지 효과가 발휘되지 않으므로 배토구에 슬라이드 게이트 등의 지수장치가 설치되는 경우가 많다. 토압식 쉼드는 다시 토압 쉼드와 이토압 쉼드로 분류된다.

토압식 쉼드는 커터 헤드로 굴착된 토사를 챔버 내에 충진시켜서 쉼드 잭의 추진력으로 가압하여 그 토압을 막장 전체에 작용시켜 안정을 꾀하면서 스크류 컨베이어 등으로 배토하는 쉼드기이다. 이 쉼드는 블라인드 쉼드에 커터 헤드를 붙여 막장을 굴착하는 것으로 토사를 유동화시켜서 유입을 용이하게 한 것으로 생각할 수 있다. 적용 토질은 커터 굴착만으로 소성 유동화되는 모래 함유량이 적은 연약 점성토이다.

이토압 쉼드는 굴착 토사의 소성 유동화를 촉진하기 위해 첨가재를 주입하는 기구와 첨가재와 굴착 토사를 강력하게 교반하는 혼합장치가 구비되어 있으며, 챔버 내에 혼입된 토사를 쉼드 잭의 추진력으로 가압하여 그 이토압을 막장 전체에 작용시켜 막장의 안정을 꾀하면서 스크류 컨베이어 등으로 배토하는 쉼드기이다. 첨가재에는 벤토나이트, CMC, 점토, 고급지수, 기포재 등이 있으며, 지반의 조건에 따라 적당한 것을 사용한다. 적용 토질은 점성토, 사질토, 사력 등 광범위한 토질에 적용한다. 이토압 쉼드는 적용 토질의 범위가 넓고 작업구 부지가 비교적 좁으므로 최근에 가장 많이 적용되고 있다.

2.3 막장안정의 이론

쉴드굴진에서 막장 안정 매커니즘은 개방형 쉴드와 밀폐형 쉴드로 분류하여 생각할 필요가 있다. 양공법의 막장안정에 대한 기본적인 방법은 개방형 쉴드에서는 막장의 지반강도에 기대하고 있는데 반해 밀폐형 쉴드에서는 이수압 또는 이토압으로 막장 개방하중에 저항함으로써 안정을 꾀하고 있는 점이 큰 차이이다.

개방형 쉴드의 시공에 있어서는 지반의 붕괴를 막기 위해 기계적인 기구가 쉴드기에 장치되거나 연약한 도심지의 지반에 대하여 각종의 지반안정을 위한 보조공법이 병용되어 왔다. 주된 보조공법으로는 압기공법, 지하수위 저하공법, 약액주입공법 등을 들 수 있으며, 시공 시에는 이를 복수로 조합하여 시공이 행하여져 왔다. 그러나 이런 보조공법에도 압기공법에 의한 산소부족, 압기내에서의 열악한 작업환경, 지하수위저하에 의한 주변지하수의 수위저하, 약액에 의한 지하수의 오염 등이 문제로 되어, 보조공법을 필요로 하지 않는 새로운 쉴드공법의 개발이 기대되어 왔다. 이와 같은 사회의 요청에 의하여 개발된 것이 밀폐형 쉴드공법이다. 그후 밀폐형 쉴드공법은 급속하게 시공실적을 신장하여 현재에는 쉴드공법의 대부분이 밀폐형 쉴드공법을 사용하고 있다. 본 장에서는 밀폐형 쉴드공법인 토압식 쉴드공법의 막장안정에 대해 알아보고자 한다.

2.3.1 토압식 쉴드공법의 막장안정

토압식 쉴드공법에서 막장안정의 특징은 다음과 같다.

- (1) 컷터에 의해 굴착한 토사를 소성유동화 시키면서 챔버내에 충만압축시켜

막장면을 누른다.

(2) 스크류콘베어 및 배토조정장치에 의해 배토량을 조정하여 굴착토량과 평형 시키면서 챔버내의 토사에 압력을 갖게 하여 막장의 토압과 수압에 저항시킨다.

(3) 챔버내 및 스크류콘베어내에 충만 압축시킨 토사에 의해 지수효과를 얻는다.

따라서 막장안정을 도모하기 위해서는 굴착한 토사에 소성유동성을 주고, 확실하게 컷터챔버에 토사를 충만시킴과 동시에 굴착토사에 지수성을 주고 것이 중요하게 된다. 토압식 쉘드공법의 막장안정을 고려할 경우, 지반조건에 의해 흙의 내부마찰각이 적고, 유동화하기 쉽고, 또 투수계수가 적은 점성토지반과 흙의 내부마찰각이 크고, 유동성이 나쁘고, 또 투수계수가 큰 사질토지반으로 분류할 필요가 있다.

2.3.2 점성 토지반에서의 막장안정

실트질층, 사질실트층등의 점성토지반에서는 컷터로 절삭된 토사는 일반적으로 원지반보다 강도가 저하하여 소성유동화한다. 또, 점착력이 크고 유동화되기 어려운 흙에서는 컷터의 교반효과, 스크류콘베어의 회전에 의한 교반, 또 챔버내에서의 물의 주입 등에 의해 유동화 시킬 수가 있다. 한편, 지수성에 대하여는 점성토지반에서는 투수계수가 적기 때문에 문제가 되지 않는다. 다음에 챔버내에 충만한 토사에 압력을 주어 막장의 수압 및 토압에 저항시킬 필요가 있다. 굴진 속도에 맞춰서 스크류콘베어의 회전토크, 회전수 및 배토게이트의 개구율을 조정하여, 굴착토량과 배토량의 균형을 도모하여 토압

의 안정을 확보한다. 일반적으로 막장토압의 관리는 챔버내 격벽에 설치된 토압계에 의해 행하여지나 유동성이 나쁠 경우는 정확하게 챔버내 토압이 계측되지 않게 되는 일이 있으므로 주의가 필요하다.

또, 챔버내 굴착토사를 충진을 과하게 하면 점성토는 압밀고화하여 굴착·배토가 불가능하게 되는 일이 있으며 첨가재의 주입이 필요하게 되는 경우가 있다.

2.3.3 사질 토지반에서의 막장안정

사질토나 사력토에서는 내부마찰각이 크고, 흙의 마찰저항이 크기 때문에 유동성을 확보하는 것은 어려우며, 또 굴착토를 챔버내 및 스크류콘베어 토크의 증대 및 쉘드잭 추력의 증대를 초래, 정상적인 굴착, 배토가 곤란하게 된다. 또 이들의 지반은 투수계수가 크고, 챔버내 및 스크류콘베어내의 압축효과만으로는 충분한 지수성이 얻어지지 못하고 막장수압이 높은 경우 게이트부에서 분발현상을 일으킨다. 그래서 이와 같은 지반에서는 막장면, 또는 챔버내에 각종 첨가재를 주입하거나, 교반장치를 설치하여 강제로 교반하여 굴착토의 유동성 및 지수성을 확보하는 방법이 취해지고 있다. 또, 지수성인 경우 로타리피더 등을 설치하여 기계적으로 처리하거나 샌드파라그를 설치하고 있다. 막장안정은 점성토지반에서와 같이 굴착토량과 배토량을 관리함으로서 막장의 수압·토압에 저항한다.

2.3.4 각종 공법에서의 막장안정

토압식 쉘드공법은 첨가재주입의 유무에 의해 토압쉘드와 이토압 쉘드로 구분된다. 토압쉘드는 굴착토사를 챔버내 및 스크류 콘베어내에 충만시켜 쉘드의 추진력에 의해 가압하여 그 토압에 작용시켜 막장을 안정을 꾀한다.

따라서 굴착·교반하는 것만으로 굴착토사가 소성유동화할 필요가 있으며 입도 조성이 적절하고 그 위에 적당한 함수율을 갖는 연약한 점성토지반의 시공에 맞다. 또, 이토압 쉘드는 굴착토사의 소성유동성을 촉진하기 위해서 첨가제를 주입하면서 굴착한 토사를 기계적으로 강제교반하여 굴착토사의 이토화를 꾀한다. 그래서, 챔버내 및 스크류콘베어내에 충만함과 동시에 쉘드의 추진력 등에 의해 가압하여, 그 이토압을 막장에 작용시켜, 막장의 안정을 꾀한다. 이 공법은 지반의 입도 조성에 따라 첨가제를 주입하여, 굴착토의 이토화, 지수성능의 향상을 꾀하고 있기 때문에 세립분이 적은 지반, 또는 지하수압이 높은 지반에는 적용가능하다.

본 절에서는 쉘드공법의 주류를 이루고 있는 밀폐형 쉘드공법중 토압식 쉘드공법의 막장안정 메커니즘 및 막장관리압력의 고려 방법에 대하여 기술하였다. 실제 시공에서는 막장조건이 시시각각 변화하며 또 토압계수의 결정이 어렵기 때문에 이론치와 실제가 일치하지 않을 경우가 많다. 따라서, 지표침하와 지중변위등을 측정하거나, 어떠한 방법으로 막장의 붕괴상황을 파악하여, 결과를 피드백 시키면서 적절한 막장관리압력을 결정하여 막장의 안정을 도모해야 한다.

2.4 쉼터널의 지반변위 원인 및 형상

2.4.1 쉼터널의 지반 변위 메커니즘

지반변위가 나타나는 방식은 지반의 종류, 쉼터기종, 시공상황에 따라 변화하지만 선행침하, 막장전침하 및 융기, 테일침하, 테일보이드침하, 후속침하의 5단계로 크게 분류할 수 있다(그림 2.3, 표 2.2).

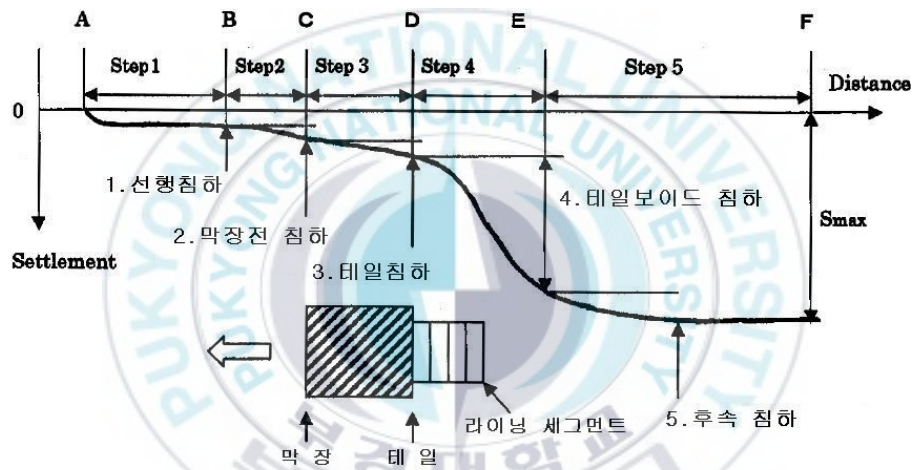


그림 2.3 쉼터기 굴착시 지반침하 원인

표 2.2 지반변위의 메커니즘

침하의 종류	원인	지반상태의 변화	변형메커니즘
① 선행침하	지하수위저하	유효토피압의 증가	압축, 압밀침하
② 막장전 침하 및 융기	막장붕괴, 과대취입 및 막장압입	지반의 응력 해방, 교란부하도압	탄소성변형
③ 테일침하	쉼터기통과시 교란	교란	압축
④ 테일보이드 침하	테일보이드의 발생	지반의 응력해방	탄소성 변형
⑤ 후속침하	이상전요인(잔유분)		압축 및 크리프 침하

선행침하는 터널막장이 지표의 측정점의 상당히 앞에 있는 시기에서 막장이 측정점의 직전에 이르는 동안에 발생하는 것으로, 쉼드기의 굴진에 따라 지하 수위저하에 의해 발생한다. 따라서 이것은 지반의 유효토피압이 증가하기 때문에 발생하는 압축·압밀침하이다. 막장전침하 및 융기는 막장이 측정점의 바로 앞에 달하는 시기로부터, 막장이 측정점 바로 밑에 도달하는 동안에 생긴 침하 또는 융기현상, 막장의 붕괴, 쉼드의 과추력 등, 막장에서의 토압 불균형에 의해 발생하는 것으로 지반의 응력해방이나 역으로 쉼드막장의 부하토압, 쉼드기의 주변마찰력의 작용에 의한 지반의 탄소성변형이다. 테일보이드 침하는 쉼드의 테일이 측정점의 직하에 막장이 도달하고 이후부터 쉼드기의 테일이 통과하는 동안에 발생하는 침하로 주로 흙의 교란에 기인한다. 테일보이드침하는 쉼드의 테일이 측정점의 직하를 통과한 후에 발생하는 침하현상으로 테일보이드에 기인하는 지반의 응력해방에 의한 탄소성변형의 침하이다. 후속침하는 주로 지반의 교란에 기인하는 압밀 및 크리프적 잔류침하이다.

이들의 침하는 항상 모두가 함께 발생하는 것은 아니며, 지반조건, 시공상황에 의해 다르게 나타난다.

2.4.2 지반변위의 분포

쉼드굴진에 따른 지반변위의 특징은 쉼드기본체를 중심으로 3차원적이며, 그 분포가 쉼드기의 진행과 함께 이동한다. 점성토 지반에서의 지반변위 특징을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 쉼드막장 정면에 흙의 취성 영역이 발생하여 이 부분의 흙은 쉼드방향으로 움직이고 있다. (쉼드 굴진의 조작에 따라서는 이 움직임이 일어나지 않을 경우도 있다.)

(2) 취성영역 외의 지반은 쉘드 본체 외주의 마찰에 의해 쉘드 진행 방향으로 밀린다.

(3) 막장의 지반은 침하한다. (쉘드 굴진의 조작에 의해서 융기하는 경우도 있다.)

(4) 테일보다 배후지반은 테일보이드 발생 때문에 침하한다. (뒤채움 주입의 조작에 따라서는 생기지 않을 수 있다.)

(5) 터널 주변의 아칭 작용은 거의 보이지 않는다.

사질토지반에서는 지반의 움직임 자체는 점성토지반의 경우와 바뀌지 않으나, 지중에서는 터널 직상 부분이 큰 침하를 나타내며, 그것보다도 위쪽 방향의 침하는 적게 나타나고 있다. 즉, 흙의 아칭현상이 발생되어, 아칭의 내측에 이완영역이 발생하게 된다.

2.5 터널에 작용하는 토압의 결정

터널에 작용하는 토압은 터널의 변형에 관계없이 정해지는 설계계산용의 토압이며, 또한 터널저부의 토압에 대하여는 반력의 토압으로 생각하여 지반 반력으로서 취급되어 왔다. 토압의 산정에 있어서는 수압도 토압의 일부로서 포함하여 생각하는 방식과 수압을 분리하여 산정하여 생각하는 방식이 있다. 일반적으로 전자는 점성토지반이며, 후자는 사질토지반에서 채용되고 있다.

2.5.1 연직 토압

터널 위치 및 지반조건에 의해 전토압을 사용할 경우와 이완토압을 사용할 경우가 있다. 일반적으로는 토피가 터널 외경에 비하여 깊고, 사질토 또는 단단한 점성토인 경우에 이완토압을 적용하며, 기타에 대해서는 흙의 아칭효과가 기대되지 않기 때문에 전토피를 고려한 전토압을 적용하고 있다. 이완토압의 산정에서는 그림 2.4에 나타난 Terzaghi의 식이 일반적으로 쓰여지고 있다.

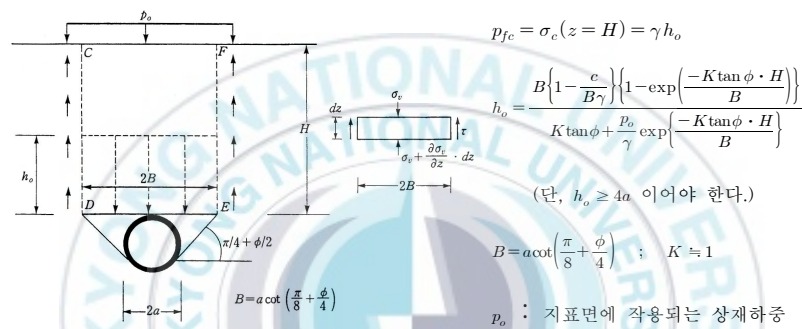


그림 2.4 이완토압

2.5.2 수평 토압

터널에 작용하는 수평토압은 앞절에서 결정한 연직토압에 측압계수를 곱하여 결정한다. 측압계수는 설계방법에 의하여 계산되나, 일반적으로는 지질조건과 지반반력계수와 관련해서 결정된다. 표 2.3은 1986년 일본 토목학회 터널표준시방서(실드편) 및 동해설에서 제정한 쉘드터널 표준 시방서(안)에서의 표준치를 나타내고 있다.

이들의 계수의 선정은 설계단면력에 큰 영향을 주기 때문에 지반조건, 하중조건을 충분히 고려함과 동시에 비슷한 시공사례를 참고로 하여 신중하게

검토할 필요가 있다.

표 2.3 측압계수 및 지반반력계수

흙의 종류	측압계수	지반반력계수	N치에 의한 기준
매우 잘 굳은 사질토 고결된 점성토	0.35 ~ 0.45	3.0 ~ 5.0	$N \geq 30$
굳은 사질토 단단한 점성토 중간정도의 점성토	0.45 ~ 0.55	1.0 ~ 3.0	$15 \leq N < 30$ $8 \leq N < 25$
		0.5 ~ 1.0	$4 \leq N < 25$
자질토 부드러운 점성토 매우 부드러운 점성토	0.50 ~ 0.60	0 ~ 1.0	$N < 15$
	0.55 ~ 0.65	0 ~ 0.5	$2 \leq N < 4$
	0.65 ~ 0.75	0	$N < 2$

2.6 지반변위의 예측

일반적으로 터널굴진은 내부지지력의 상실과 지반손실을 가져와 토립자간의 큰 전단변형을 발생시키며 또한 소성영역을 확장시키게 되는데, 이러한 영향들은 점차 지표까지 전달되어 침하를 발생시키게 된다.

굴착에 따른 주변 구조물의 안전에 큰 영향을 미치는 지표침하에 대해서는 경험적 방법, 이론적 해석방법, 모형실험, 현장계측 등의 방법으로 많은 연구가 수행되어 왔으며, 최근까지의 이러한 연구 결과는 지반의 거동문제를 완전하게 규명하지는 못하고 있으나, 지반의 침하형태에 있어서는 거의 일치하는 결과를 보이고 있다.

셸드 굴진에 따른 지반변위의 예측법은 컴퓨터가 보급되지 않았던 수십년 전까지는 기하학적 형상만으로 하여, 침하량을 구하는 방법과 단일의 지반조건을 이용한 방법들이 사용되었다. 그러나 현재에는 이러한 조건에 대하여

토층구성, 테일보이드 발생, 뒤채움 주입 등의 시공조건을 해석에 고려한 유한 요소법에 의해 예측해석을 하는 것이 일반적이다. 최근에는 굴착심도가 깊은 터널과 해석 대상범위가 넓은 경우에 계산시간을 단축하기 위해 경계요소법을 받아들인 해석법이나, 2차원으로 3차원적 효과를 표현하기 위해 미리 축대칭 모델로 특성곡선을 구해놓고, 이 특성곡선을 근거로 2차원 모델로 막장의 진행에 맞춰서 단계적으로 응력을 해방하여 지표경사곡선을 구하는 해석법도 연구되고 있다. 쉘드굴진에 따른 지반변위의 대표적인 예측법을 표 2.4에 나타내었다.

표 2.4 지반변위해석법의 분류

분 류	변 수	예측방법
계획 · 설계조건에 의해 산출	쉘드직경, 토피	Bringgs, L. Rozsa, Peck 등
계획 · 설계조건과 지반조건에 의해 산출	쉘드직경, 지반(단층)	Jeffery 등
계획 · 설계, 지반, 시공조건에 의해 산출	쉘드직경, 토피, 테일보이드, 지반(다층), 뒤채움, 세그먼트	수치해석

그렇지만 이상과 같은 여러 가지 해석법이 연구되고 있는 지반의 종류가 다양하거나, 시공방법, 시공상황도 천차만별이기 때문에 모든 영향요인을 고려할 수 있는 해석방법은 없는 것이 현실이다.

2.6.1 횡방향 침하형태의 예측

횡방향 지표침하형태는 정규분포곡선과 비교적 근사하게 나타나므로 아래와 같은 예측식들이 보고되고 있다.

(1) Aversin의 식

S. G Aversin(1954)은 러시아의 채광연구소에서 광산터널 굴착시 관찰한 지반변형 자료에 기초를 두고 아래와 같은 침하곡선을 제안하였다.

$$S_x = S_{\max} \left(1 - \frac{x}{L}\right)^{\left(\frac{L}{l}\right)^2} \cdot \exp\left(\frac{L}{l^2}\right) \cdot x \quad (\text{식 2.1})$$

여기서, x : 터널 중심부터 임의의 점까지의 횡방향 거리

$S_{\max}$: 터널 중심에서의 최대 침하량

l : 변곡점까지의 거리(m)

L : 침하 영향범위

또한 현장관측자료분석으로부터 Aversin은 $L = 2.13l$ 로 추정하여 다음과 같이 좀더 간편한 식을 유추하였다.

$$S_x = S_{\max} \left(1 - \frac{x}{2.13l}\right)^{4.54} \cdot \exp\left(2.13 \cdot \frac{x}{l}\right) \quad (\text{식 2.2})$$

(2) Peck의 식

R. B. Peck(1969)은 많은 계측자료의 분석으로부터 횡방향 침하형태가 정규분포곡선의 형태로 보아 다음 식을 제안하였다.

$$S_x = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i}\right) \quad (\text{식 2.3})$$

여기서, i : 곡선의 변곡점까지의 수평거리(m)

2.6.2 터널상부의 최대침하량 예측

터널상부의 최대지표침하량은 함수해석법이나 유한요소법과 같은 이론적 해석방법이나 모형실험 및 현장계측에 의해 추론된 방법들에 의해서 예측이 가능하다. 이러한 최대침하량의 예측은 상부구조물의 안전평가에 중요한 요소가 되며, 주변지반의 침하분포를 추정하는 데에도 필요한 요소이다.

(1) Limanov의 식

Limanov(1957)는 반무한 탄성지반내에 만들어진 원형터널에 의해서 발생하는 최대지표침하량을 다음과 같은 식으로 표시하였다.

$$S_{\max} = (1-\mu^2) \frac{P}{E} \frac{4\gamma_0^2 h_0}{(h_0^2 - \gamma_0^2)} \quad (\text{식 2.4})$$

여기서, μ : 지반의 프아송비

E : 지반의 변형계수 (t/m^2)

γ_0 : 터널의 반경 (m)

h_0 : 터널 깊이 (m)

이식은 흙의 자중은 고려하지 않고 터널 전주면의 각점에서부터 터널중심으로 향하는 일정한 인장력 P 가 터널에 작용하는 것으로 보아 지반침하를 해석한 것이다. 인장력 P 는 터널굴착에 의해 해방된 주면상의 응력과 근사하기 때문에 지반굴착전에 받고 있던 연직토압 γh_0 로 보고 침하량을 구할 수 있다.

(2) Peck의 식

Peck은 광산터널에서 이용되고 있는 추계학적인 모형들을 얇은 깊이에서 시공되는 도시터널의 지반침하해석에 적용시킴으로서 도시 터널의 지반침하해석에 관한 연구를 활성화시켰다. Peck은 추계학적모형인 가우스 정규분포곡선으로 침하현상을 규정하기 위하여 곡선상의 변곡점까지의 수평거리 i 값을 현장계측자료분석을 통하여 다음과 같은 식으로 표시하였다.

$$\left(\frac{i}{R}\right) = \left(\frac{Z_0}{2R}\right)^{0.8} \quad (\text{식 2.5})$$

여기서, R : 터널반경

Z_0 : 터널깊이

(3) Attlewell의 식

Attlewell(1981)은 Peck과 같이 침하곡선의 기본식을 정규분포곡선으로 하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$S_{\max} = \frac{V}{\sqrt{2A} i} \quad (\text{식 2.6})$$

$$\frac{i}{R} = K \left(\frac{Z}{2R} \right)^n$$

여기서, V : 침하부분의 단면적

A : 터널굴착 단면적

K, n : 지반의 종류에 의해 결정되는 지질상수 (표 2.5 참고)

R : 터널굴착반경

또한 Attlewell은 좀더 세분된 지질형상에 따라 i 값의 변화를 고찰한 결과, 정규압밀점토의 경우는 침하곡선의 경사위치는 Peck의 식을 따르나 과압밀 점토의 경우는 약 1.5배정도 더 크게 나타난다고 제시하였다.

표 2.5 V, K, n 의 상관계수 (Attlewell 방법)

지반의 종류	지반손실	K	n	비고
점성토	1.3 ~ 2.5 0.15 ~ 13 5	1	1	사층, 지하수위 이상 혹은 이하 예측침하량 산정
사질토		0.82 0.74 0.63	0.36 0.90 0.97	지하수위 이상 지하수위 이하 지하수위 무시
매립지	6 ~ 16	1.7	0.7	

(4) O' Reilly-New의 식

O' Reilly-New(1982)는 영국에 널리 분포되어 있는 점성토 지반, 사질토 지반, 매립지반 등 여러 곳에서의 터널계측자료를 분석한 결과, 침하곡선을 규정하는 최대침하량, 변곡점까지의 수평거리(i) 등과 터널깊이, 터널직경, 굴착

토량 등의 상관관계로부터 실제의 침하곡선폭이 $6i$ 로 나타난다고 보고하였으며, i 는 터널직경과는 거의 관계가 없고 터널깊이와 관계가 있는 것으로 하며 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$i = 0.43z + 1.1 \text{ (점성토 지반)} \quad (\text{식 2.7})$$

$$i = 0.28z - 0.1 \text{ (사질토 지반)} \quad (\text{식 2.8})$$

위 식을 간단히 하면 $i = Kz$ 가 되며 지질에 따라 K 의 범위를 표 2.6와 같이 정하였다. 그러나 제안된 식은 터널깊이가 터널직경보다 크고 터널직경은 1~5 m로 비교적 작으며, 터널깊이는 사질토의 경우 최대 10 m, 점성토인 경우 최대 30 m인 도시터널에 대한 계측자료를 분석하며 제시된 것이므로 사용에 제약이 따른다.

표 2.6 점성토 지반에서의 침하 곡선에 관한 정수

지반조건	지지방법	K	$V_s/V_e(\%)$	비 고
균열을 갖는 강성 점토 빙하퇴적물	셴드 및 기타지지방법	0.4~0.5	0.5~3	지반손실은 1~2 % 지반변위억제용 압기사용
	일반 셴드	0.5~0.6	2~25	
	압기셴드		1~1.25	
실트질 점토층 ($c_u=10\sim40$ kN/m^2)	일반 셴드	0.6~0.7	30~45	
	압기 셴드		5~2	

제 3 장 3차원 유한요소법에 의한 지반 및 라이닝 변형거동

3.1 3차원 유한요소 프로그램 모델 검증

프로그램의 검증을 위하여 실측자료들을 선택하여 본 연구에서 사용된 프로그램으로 도출한 해석결과와 비교 검토하여 프로그램의 타당성을 검증하였다.

3.1.1. 검토구간 수치예제 해석

사용된 (주)마이다스아이티사에서 개발한 지반해석전용프로그램인 MIDAS-GTS를 이용하여 기존의 쉘드터널 현장사례에 대한 해석을 수행하였다. 국내에서는 적용된 쉘드 TBM에 대한 정확한 현장계측자료의 수집이 용이하지 않은 관계로 부득이 1999년 영국에서 쉘드 TBM을 적용하여 테임즈강 하부를 관통하여 Island Garden Station과 Greenwich를 잇는 직경 6.82 m, 연장이 약 6.82 m인 지하철 터널의 현장사례를 택하였다. 현장 계측은 지반의 단기적 거동뿐만 아니라 시간의존적 거동특성을 알아보기 위해 장기적으로도 수행하였으나, 본 연구에서는 비배수 거동에 국한하였으므로 단기거동 계측결과만을 수치해석 결과와 비교하였다.

본 굴착에 사용된 쉘드기는 외경 5.85 m, 본체길이 6.82 m를 가지며, 도입된 라이닝은 두께 0.25 m, 폭 1.2 m의 콘크리트 세그먼트로 구성되어 있다. 굴착되는 지층이 대부분 점토층에서 본 터널이 시공되기 때문에 본 굴착과정에서 도입된 쉘드기의 막장압은 18~25 kN/m²의 분포를 보이며 작용하고 있다. 또한 테일보이드를 추진하기 위한 주입압은 평균 200 kN/m²의 다양한 분포를 보이며 본 쉘드 TBM에 적용되고 있었다.

그리고 터널이 관통되는 각 지층에 대한 토질정수는 실내시험을 통해서 도출된 값을 적용하였다. 표 3.1는 실내시험을 통해 계산된 터널의 해석영역에

대한 지층 물성치를 제시한 것이다.

이와 같은 조건을 3차원 유한요소 수치해석 프로그램을 통해서 그림 3.1에 제시된 유한요소망을 형성하여 해석을 수행하였으며, 적용된 해석대상 영역은 깊이가 40 m, 폭이 40 m 그리고 길이는 20 m으로 구성된다. 이러한 해석단면에 쉘드 TBM의 시공단계에 따라서 20 m 굴진시 지표거동을 유한요소법을 사용하여 도출하였다.

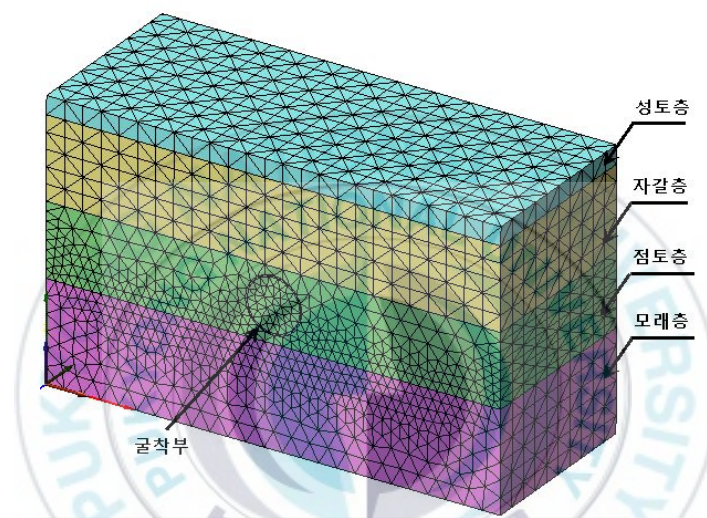


그림 3.1 쉘드터널 유한요소망

표 3.1 적용 토질정수

토질정수 \ 지층	성토층	자갈층	점토층	모래층
변형계수 (MN/m^2)	70,000	60,000	32,000	100,000
프아송비 (ν)	0.25	0.3	0.25	0.3
단위중량(습윤) (γ_t , kN/m^3)	26.0	27.0	19.0	27.0
점착력 (C , kN/m^2)	0	0	3600	0
내부마찰각 (ϕ , $^\circ$)	36.0	29.5	21.0	37.0

3.1.2 해석결과

그림 3.2는 본 3차원 유한요소해석 프로그램을 사용하여 계산된 쉘드 굴진 시 시공단계별 횡방향의 지표침하량을 나타내고 있다. 쉘드기가 통과중에 지표면의 침하거동과 최종침하량으로 나누어서 계산값을 제시하였으며 이를 계측치와 비교하였다. 또한 횡방향의 최종침하곡선을 1969년 Peck이 제안한 침하곡선식에 의해 그 계산값을 본 그래프에 함께 제시하였다. 최종 횡방향 침하형태를 기준으로 보면 3차원 수치해석 프로그램으로 계산된 값과 Peck(1969)에 의해 제안된 식에 의해 도출된 곡선 그리고 본 현장에서 시공시 계측한 데이터 모두 잘 부합됨을 알 수 있었다.

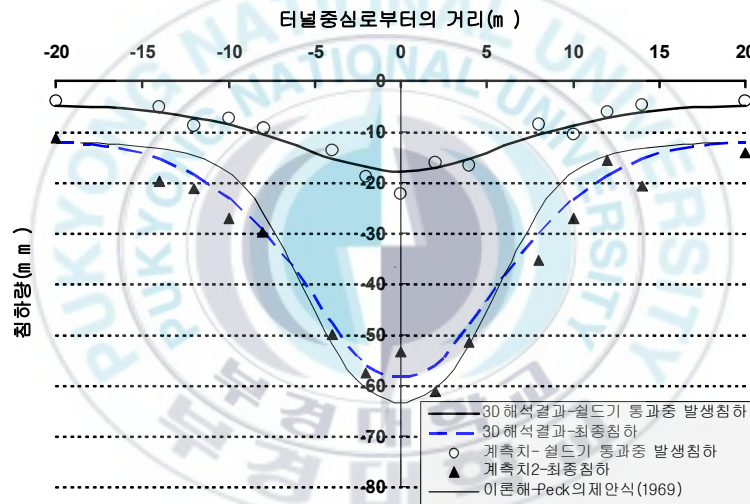


그림 3.2 횡방향 침하곡선

그림 3.3은 쉘드기의 굴진거리, 즉 시공단계에 따라 쉘드기 직상부에 발생하는 지표면의 중방향의 침하량을 본 연구에 적용된 3차원 수치해석 프로그램

을 이용하여 계산한 값이다. 본 수치해석치를 계측치와 비교검토한 결과 최대 침하가 발생하는 구간에서 약 9.1 mm의 오차가 발생하였고, 최종침하량에 서는 계산치와 계측치가 각각 -5.8 mm, -5.2 mm로 미소한 차를 나타내었다.

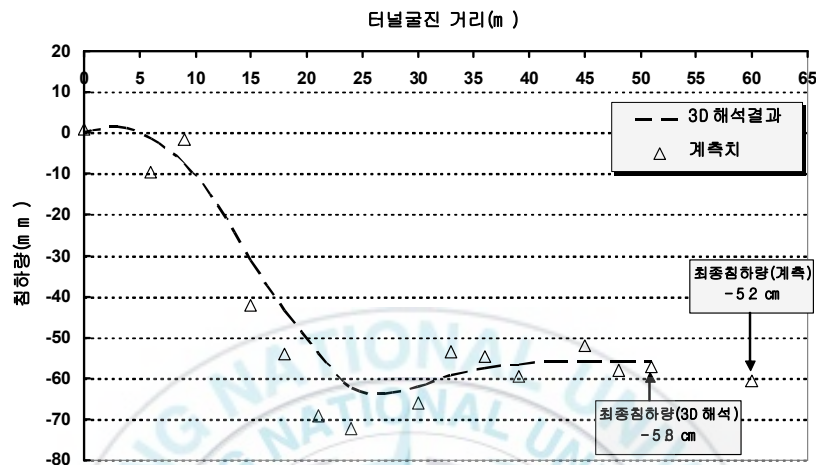


그림 3.3 종방향 침하곡선

이상의 결과로부터 도출된 본 3차원 수치해석 프로그램의 검증을 바탕으로 다음 3.2장에서 언급될 매개변수를 통해서 쉘드 TBM 적용시 지표거동 및 라이닝 거동을 분석하고 차후 쉘드 TBM 적용시 3차원 유한요소해석을 통해 시공시 발생하는 지표거동을 예측하여, 굴진시 발생하는 시공하중과 지표거동의 상관관계를 규명하고자 한다.

3.2 매개변수 연구

본 장에서는 쉘드 TBM 적용한 터널의 사전 설계와 각종 지반보고서를 참조하여 기본 케이스를 결정하고 모델별 설계 매개변수를 선정하였으며, 선정된 매개변수에 대해 3차원 수치해석을 통해 도심지에서의 저토피 구간의 쉘드 TBM 적용시 지표거동과 터널 라이닝의 거동을 평가하였다.

3.2.1 기본 입력 자료의 구성

1) 지반 입력 자료

쉴드터널에 의한 지반의 거동을 해석하는 데 있어 가장 중요한 사항은 해당 지반특성을 얼마나 해석에 잘 적용하는가에 있다. 쉴드 TBM 설계시 지반물성이 터널 주변지반의 거동에 미치는 영향은 매우 크기 때문에 보다 합리적인 해석에 사용되는 설계정수 산정에 세심한 주의가 요구된다. 3.1절의 시공사례에 적용된 입력자료 및 대상 터널의 연구논문을 바탕으로 본 연구에는 도심지의 저토피고에 적용되는 쉴드 TBM을 모사하기 위해 표 3.2와 같이 지반의 기본 입력자료를 결정하였다.

표 3.2 기본 해석 케이스

구분	단위중량 (kN/m ³)	탄성계수 (kN/m ²)	포아송비	점착력 (kN/m ²)	내부마찰각 (°)	터널굴착 토피고
지층1	22	1×10 ⁷	0.3	2,942.0	36.0	0.75D

2) 쉘드 지보재 입력 자료

전술한 지반의 입력치를 바탕으로 쉘드기, 설치되는 터널 라이닝 그리고 테일보이드 내에 주입되는 그라우트재에 대한 제원 및 물성에 대한 입력자료를 산정하여 표 3.3에 제시하였다.

쉘드기, 터널라이닝은 Shell 요소로서 모델링하였으며, 쉘드기의 Jack은 쉘드본체와 라이닝의 절점을 연결하는 Beam 요소로서 모델링하였다. 테일보이드 그라우트재의 경화 과정을 모델링하기 위해 그라우팅시 주입되는 주입재의 탄성계수와 투수계수를 시공단계별로 다르게 적용하였다. 시공단계에 따른 모델링 방법은 3.3절에서 세부적으로 언급하겠다.

표 3.3 쉘드 지보재 입력 자료

쉘드기		테일보이드 그라우트재	
막장부 직경	8.0 m	탄성계수(28일 후)	$1 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$
테일부 직경	7.94 m	탄성계수(1일)	$1 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$
길이	4.9 m	프아송비	0.3
무게	6,000 kN	초기투수계수	1
마찰계수(지반-쉘드기)	0.2	28일 후 투수계수	$1 \times 10^{-4} \text{ kN/h}$
터널 라이닝		단위중량	2.1 kN/m^3
외경	7.5 m	기 타	
두께	0.3 m	잭추력(터널축방향)	110 kN/m^2
링길이	1.5 m	1링 조립시간	0.5 h
탄성계수	$2 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$	굴착속도	1.5 m/h
프아송비	0.3		
단위중량	24.5 kN/m^3		

3.2.2 매개변수의 선정 및 각각의 입력자료

셸드 TBM 적용시 막장의 안정을 유지하기 위한 막장압의 유지관리가 필수적인 요소로 인식되고 있고, 셸드기 본체에서 조립된 라이닝이 테일보이드 구간을 통과하면서 발생하는 지반거동 및 라이닝 거동이 중요한 인자로 대두되고 있다. 위와 같은 셸드 TBM의 지반거동에 대해 막장압과 그라우트압을 매개변수로 하여 그 영향을 평가하고자 표 3.4에 나타낸 바와 같이 서로 다른 조건을 적용하여 해석을 수행하였다.

표 3.4 해석조건

막장압 (kN/m ²)	그라우트 주입압 (kN/m ²)	해석 개수
10, 18, 20, 45, 75, 120	120, 140, 200, 250	24 개

3.3 3차원 수치해석 모델

3.3.1 시공단계별 모델링 과정 소개

본 연구에 사용된 3차원 유한요소 해석은 그림 3.4와 같이 지반, 쉘드기, 잭(Jack), 터널 라이닝 그리고 테일보이드 그라우트 개별적인 모사 가능하도록 하였다.

첫 번째로 TBM은 전체적으로 이동이 가능한 강체요소(rigid body)로 모사하였다. 그리고 쉘드기 표면과 지반과의 마찰을 고려하여 두 접촉면에 인터페이스 요소를 각 절점에 작용하여 일정한 상대변위가 발생하고 유지되도록 하였다. 두 번째로 잭은 2개의 절점요소로 나타내었다. 이 두 절점은 터널 라이닝의 요소절점과 TBM의 쉘드기의 굴착헤더부분과 연결되어 있다. 이 때 TBM의 굴착헤더부분과 잭요소와의 연결은 회전과 분리가 없는 강절로 연결하였다.

터널굴진의 모사는 그림 3.4의 (a), (b), (c)의 일련의 과정을 거치며 이루어 진다. 그림 3.4(a)에 제시된 요소를 시작으로 잭을 나타내는 빔 요소를 연장시킴으로서 쉘드기를 굴착면 전방으로 추진시킨다. 그림 3.4(b)와 같이 쉘드기의 굴진은 일시적으로 지반과 터널라이닝 사이의 공극 즉, 테일보이드를 남긴다. 테일보이드내로 변형을 합리적으로 예측하도록 하기위해 이 발생한 공극주위로 길이방향의 세분화된 매쉬를 형성하였다. 다음단계로 굴착경계에서 절점을 재배치하고 기존의 매쉬를 제거하고 커터면의 매쉬를 재배열하고 다음단계의 매쉬로 변환함으로서 굴착을 완료되게 된다. 이러한 일련의 방법으로 지반과 쉘드기 표면 사이의 접촉상태와 커터헤드의 과굴착 및 굴착경계 조건을 정확하게 모사할 수 있다.

추가로 본 연구에서는 막장압 적용하기 위한 경계조건을 챔버(chamber)가 위치한 커터면에 도입하였다. 또한 쉘드기 통과중 발생하는 테일보이드 그라우트를 적용하기 위한 새로운 요소를 도입하여 그라우트압 뿐 아니라 라이닝

설치후 뒤채움 그라우트재의 충진으로 형성되는 공간의 절점들을 나타내었다.

또한 그림 3.4(c)와 같이 쉴드가 라이닝의 한 개의 폭만큼 굴진하면 쉴드 기 내부에서 조립된 새로운 라이닝 요소를 활성화되며 쉴드 기 굴진을 위한 추진력을 책요소를 활성화되어 새로 활성화된 라이닝요소의 절점과 연결된다.

이상의 일련의 과정을 반복하며 쉴드 TBM의 굴착을 모사하였으며, 막장압과 뒤채움 그라우트재의 주입압을 매개변수로 하여 각 시공단계별로 지표면, 터널 인접구간 그리고 라이닝의 설치이후 거동특성을 평가하였다.

모델링시 굴착전 원지반의 응력, 내부변수 그리고 지반의 지하수위의 따른 간극수압을 지반내의 초기조건으로 형성후 전술한 바와 같이 굴착모델링을 수행하였다.

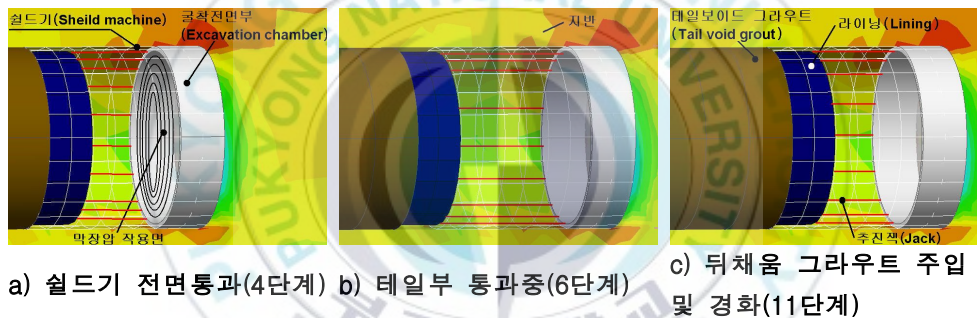


그림 3.4 쉴드터널 굴착 모델링
(각 요소 및 시공단계별 모델링과정 소개)

3.3.2 적용 모델 소개

본 연구에 적용된 지반 모델은 저토피고 터널 시공을 모사하였다. 본 터널은 직경 8.0m이고 토피고는 0.75D이며, 지하수위는 지표면에 있다고 가정하였다. 3.2절의 매개변수 연구에서 언급한 표 3.2와 표 3.3에 제시된 변수로서 수치해석을 수행하였다.

지반은 길이 50m, 폭 50m, 높이 25m이다. 적용된 3차원 요소망은 사각형 요소로 구성되면 지반과 그라우트를 각각 모사하였다. 그리고 9개의 빔요소로 책을 모사하였다. 책을 모사하는 요소 이외에도 3.3.1절에서 언급된 시공 과정에서 발생하는 요소들을 적용하여 모사하였다. 본 모델은 62,603개의 자유도로 구성하고 16,622개의 절점으로 구성된다.

굴착과정에서 그림 3.5에 정의된 위치에서 각 매개변수들의 변화에 따른 지반의 거동 차이를 분석하였다.

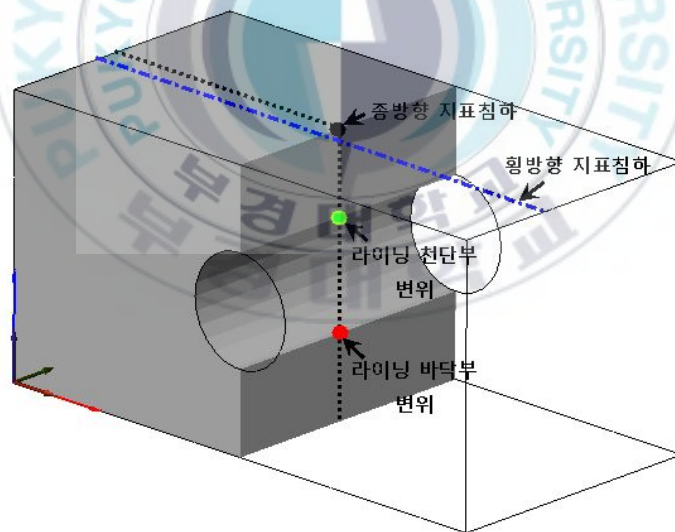


그림 3.5 유한요소망과 변위 관측위치

3.4 수치해석 결과

전술한 3차원 유한요소법을 이용하여 적용된 지반의 쉘드 TBM 굴착시 발생하는 종방향, 횡방향 지표침하량 그리고 터널 라이닝 측벽부에서 4.0 m이격된 위치에서의 수평변위 및 라이닝 천단부 및 바닥부의 연직변위량을 쉘드 TBM의 시공단계와 설정한 매개변수에 따라서 해석결과를 다음과 같이 제시하였다. 표 3.5는 그림 3.5에 정의된 관측지점에서 쉘드 TBM 굴진시 단계별로 발생하는 시공과정을 나타내고 있다.

표 3.5 시공단계

구 분	과 정
시공 1단계 ~ 시공 3단계	• 쉘드기 막장부 접근
시공 4단계 ~ 시공 5단계	• 쉘드기 통과중
시공 7단계	• 쉘드기 테일부 통과중
시공 8단계	• 라이닝 설치및 뒤채움 그라우트압 작용
시공 11단계	• 뒤채움 그라우트재 경화

3.4.1 지표침하량

1) 종방향 침하 곡선

일반적으로 쉘드 TBM 굴착시 터널 천단부 상단의 지표에서 발생하는 종방향 침하는 서론에서 전술한 일반적인 경향을 보이며 본 연구에서는 쉘드기 통과 전·후 침하량과 최종 침하량의 변화에 핵심을 두고자 한다.

전술한 시공단계에 따라 쉘드 TBM 시공단계에서 테일부를 통과 후(시공 8 단계~시공 9단계) 설치된 라이닝과 지반사이에 테일보이드를 뒤채움 그라우트재로 주입하는 과정에서 라이닝과 지반내에 작용하는 그라우트 압에 대해 종방향의 지표침하곡선을 그림 3.6 ~ 그림 3.14에 나타내었다.

그래프 중 그림 3.6 ~ 그림 3.10는 작용된 특정 막장압에 대해 다양한 그라우트압에 따라 발생하는 지표의 종방향 침하곡선을 나타내고 있으며, 일반적으로 테일보이드내에 작용되는 그라우압이 증가할수록 테일보이드주입이후 시공 단계에서 지표의 침하가 작게 발생하여 그라우트재의 경화 후 최종침하량에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 표 3.6에 본 연구에 적용된 그라우트 압 250 kN/m^2 과 120 kN/m^2 을 각각 작용했을 때 막장압에 따라 발생한 지표의 상대 침하량을 정리하여 나타내었다.

표 3.6 특정 막장압을 기준으로 그라우트압에 따른 침하량 비교

구 분		그라우트압 적용 직후 침하량 (시공 10단계)	최종침하량 (시공 17단계)
그라우트압 120 kN/m ² 와 그라우트압 250 kN/m ² 과의 상대 침하량(%)	막장압 10 kN/m ²	16.7 % 감소	9.0 % 감소
	막장압 20 kN/m ²	16.3 % 감소	10.7 % 감소
	막장압 45 kN/m ²	14.5 % 감소	13.6 % 감소
	막장압 75 kN/m ²	27.8 % 감소	12.9 % 감소
	막장압 120 kN/m ²	43.5 % 감소	23.7 % 감소

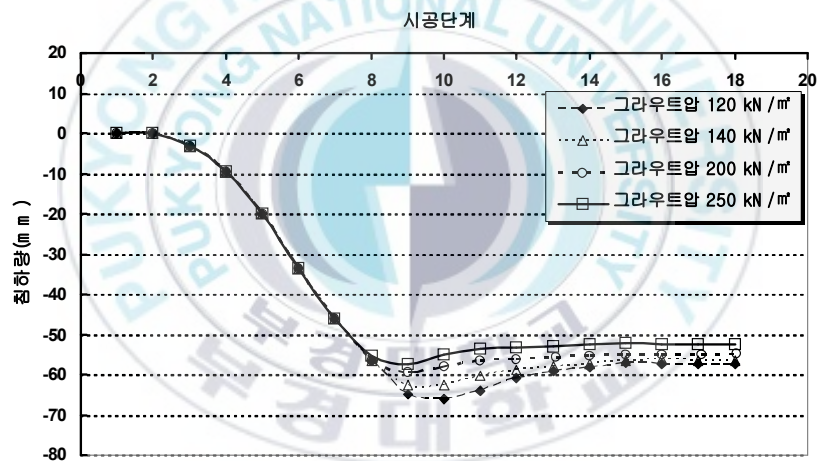


그림 3.6 종방향 침하곡선(막장압 10 kN/m² 작용시)

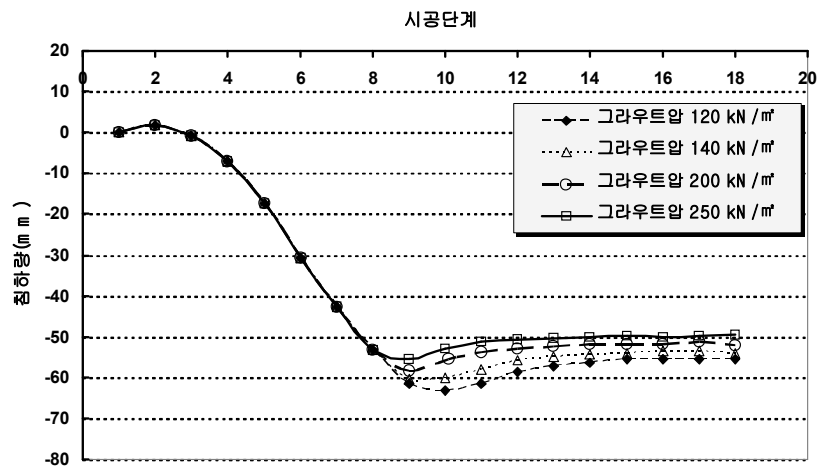


그림 3.7 종방향 침하곡선(막장압 20 kN/m² 작용시)

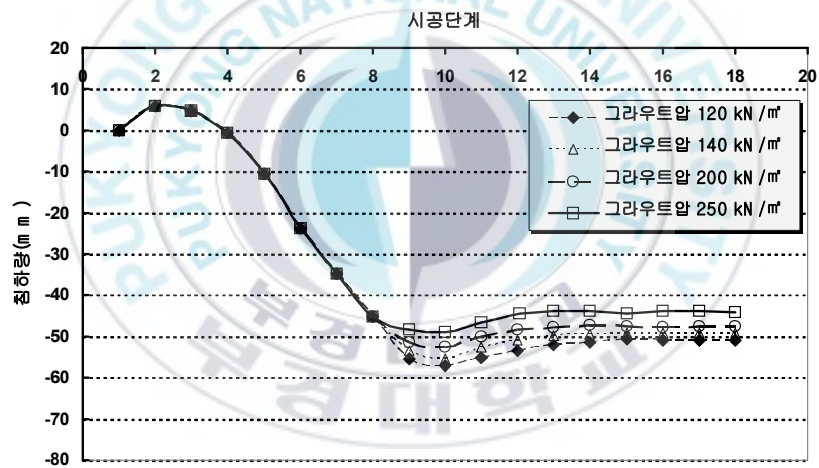


그림 3.8 종방향 침하곡선(막장압 45 kN/m² 작용시)

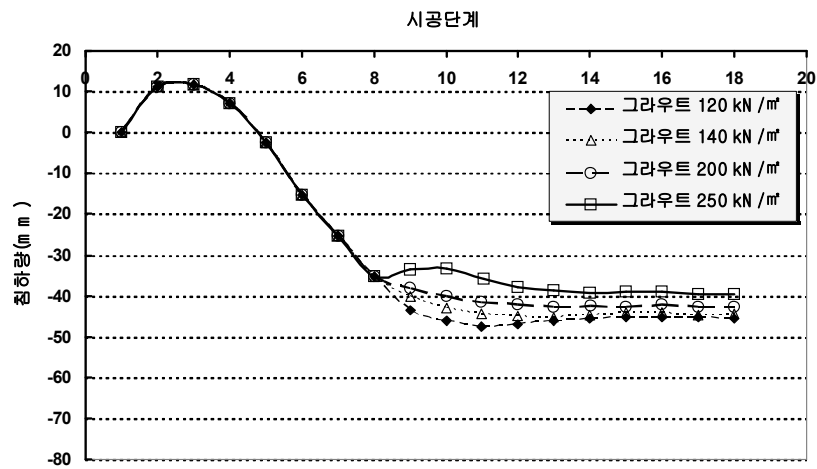


그림 3.9 종방향 침하곡선(막장압 75 kN/m² 작용시)

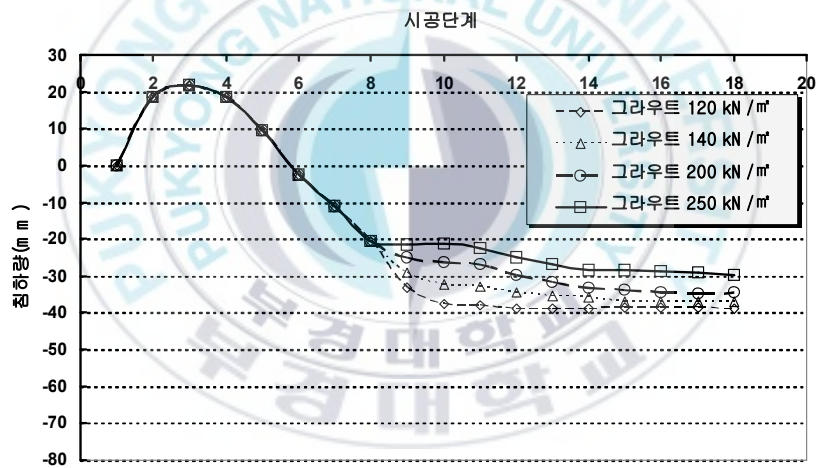


그림 3.10 종방향 침하곡선(막장압 120 kN/m² 작용시)

그림 3.11 ~ 그림 3.14는 특정 그라우트압에 대해 다양한 막장압에 따라 발생하는 지표의 종방향 침하곡선을 나타내고 있다. 공통적으로 막장압이 증가할수록 쉘드기 통과 전·후(시공 3단계~시공 4단계)에서 융기되는 경향을 보인다. 그리고 표 3.7와 표 3.8는 이들 그래프를 요약·정리하여 제시한 것으로서 막장압이 증가하면 통과부에서는 융기현상과 함께 최종침하량에는 감소되는 경향을 보이고 있다. 반대로 막장압이 감소할수록 쉘드기 통과 전후로 지표가 침하하는 경향을 보이며 최종침하량은 증가하는 경향을 보였다.

표 3.7 특정 막장압을 기준으로 그라우트압에 따른 변위 비교

구 분		쉘드기 통과 전·후 융기량 (시공 3단계~시공 4단계)	최종침하량 (시공 17단계)
막장압 10 kN/m ² 와 막장압 120 kN/m ² 과의 상대 변위량	그라우트압 120 kN/m ²	25 mm 융기	18.58 mm 감소
	그라우트압 140 kN/m ²	25 mm 융기	19.42 mm 감소
	그라우트압 200 kN/m ²	25 mm 융기	19.1 mm 감소
	그라우트압 250 kN/m ²	25 mm 융기	18.80 mm 감소

표 3.8 특정 그라우트압을 기준으로 막장압에 따른 변위 비교

구 분		쉴트기 통과 전 · 후 침하 또는 융기량 (시공 3~4단계)	최종침하량 (시공 17단계)
막장압 10 kN/m ²	그라우트압 120 kN/m ²	3.17 mm 침하	54.2 mm 침하
	그라우트압 140 kN/m ²	3.17 mm 침하	56.5 mm 침하
	그라우트압 200 kN/m ²	3.20 mm 침하	55.5 mm 침하
	그라우트압 250 kN/m ²	3.16 mm 침하	54.2 mm 침하
막장압 45 kN/m ²	그라우트압 120 kN/m ²	4.81 mm 융기	50.9 mm 침하
	그라우트압 140 kN/m ²	4.82 mm 융기	49.2 mm 침하
	그라우트압 200 kN/m ²	4.79 mm 융기	47.5 mm 침하
	그라우트압 250 kN/m ²	4.83 mm 융기	45.7 mm 침하
막장압 120 kN/m ²	그라우트압 120 kN/m ²	21.90 mm 융기	38.80 mm 침하
	그라우트압 140 kN/m ²	21.88 mm 융기	37.08 mm 침하
	그라우트압 200 kN/m ²	21.93 mm 융기	36.40 mm 침하
	그라우트압 250 kN/m ²	21.84 mm 융기	35.4 mm 침하

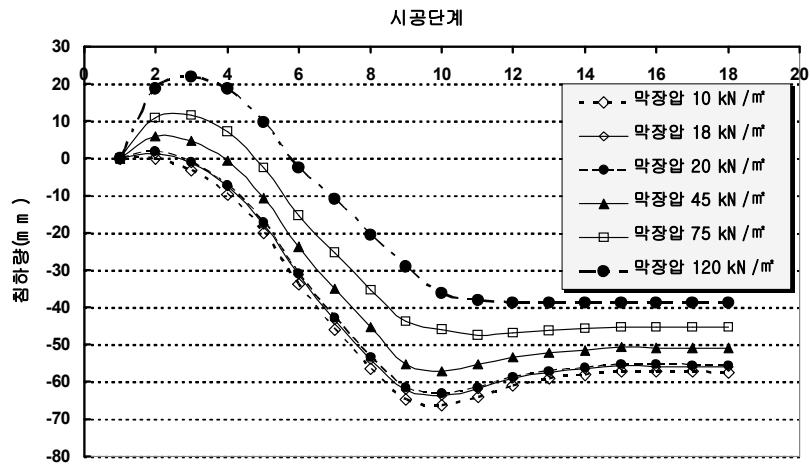


그림 3.11 종방향 침하곡선(그라우트압 120 kN/m² 작용시)

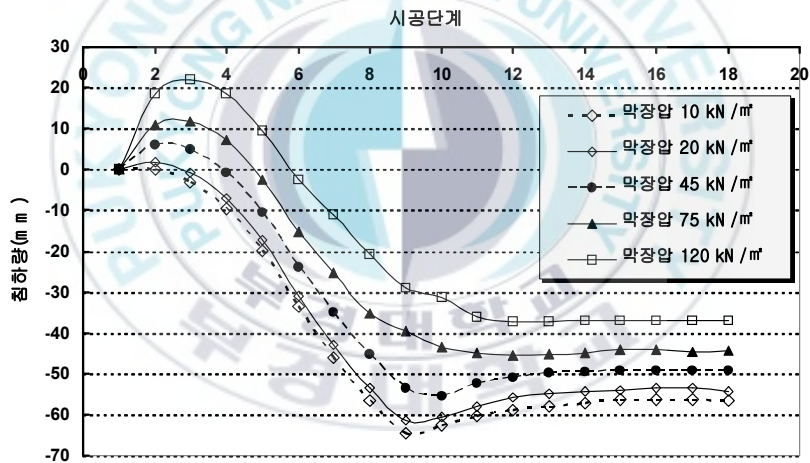


그림 3.12 종방향 침하곡선(그라우트압 140 kN/m² 작용시)

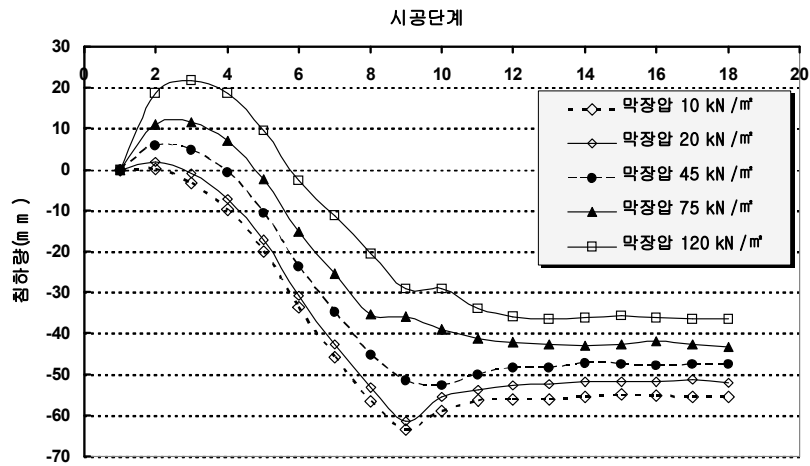


그림 3.13 종방향 침하곡선(그라우트압 200 kN/m² 작용시)

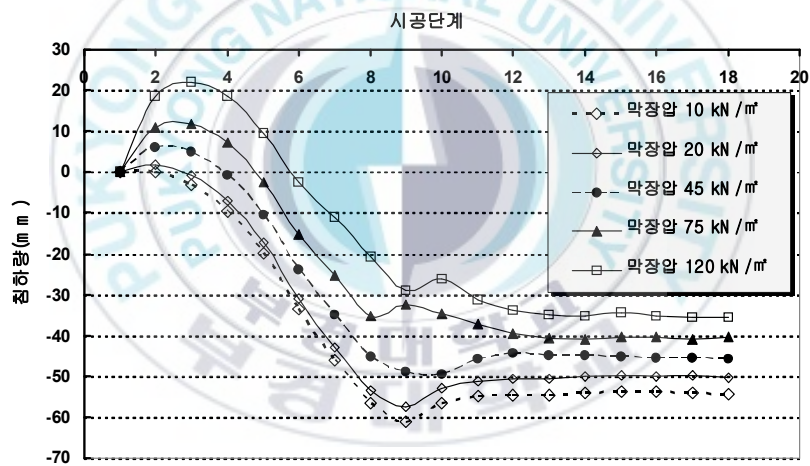


그림 3.14 종방향 침하곡선(그라우트압 250 kN/m² 작용시)

2) 횡방향 침하 곡선

셸드 TBM 굴착시 터널 천단부 상단의 지표에서 발생하는 횡방향 침하경향은 다음의 그림 3.15와 그림 3.16에 제시된 그래프와 같이 천단부의 침하가 가장 크며 터널중심을 기준으로 대칭을 이루는 형태로 침하가 발생한다.

그림 3.15은 이상에서 언급한 지표침하를 굴착단계에 따라 횡방향 침하경향을 나타내고 있다. 셸드 TBM 굴착과정에서 셸드기가 본 연구의 측정지점을 접근하는 단계(시공 3단계~시공 4단계)에서부터 테일보이드내에 뒤채움 그라우트재가 경화(시공 8단계~ 시공 11단계)하여 최종침하에 이르기까지 일련의 시공단계마다 횡방향 침하곡선을 나타내었다. 셸드 TBM 굴착과정 중 셸드기가 테일부를 통과하면서 형성되는 테일보이드 영역내에서 상대적으로 큰 침하가 발생하여 테일보이드 그라우트재 주입에 따라 수렴되다가 이후 그라우트재의 경화과정과 함께 최종침하에 이르게 된다.

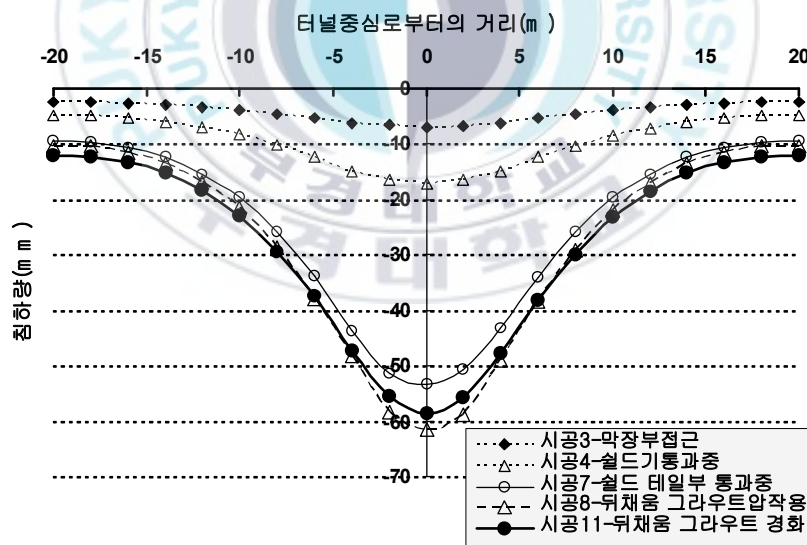


그림 3.15 횡방향 침하곡선

그림 3.16는 막장압의 변화에 따라 발생하는 횡방향 최종 침하곡선 나타내었다. 막장압이 증가함에 따라서 막장면 토사의 응력이완을 억제함으로서 최종 침하량에 영향을 미친 것으로 판단된다.

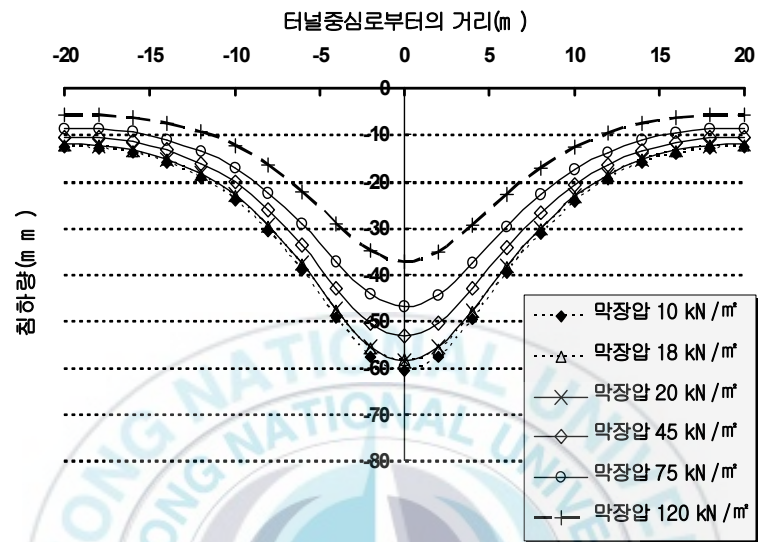


그림 3.16 횡방향 침하곡선(그라우트압 140 kN/m²작용시)

3.4.2 지중 축방 거동

본 터널의 수평변위 해석구간을 그림 3.17에 나타내었다. 해석과정에서 해석 구간의 오른쪽으로의 변위를 양의 부호로 정의했으며, 왼쪽으로의 변위를 음의 부호로 정의하였다. 터널 라이닝 측벽부에서 약 4.0 m이격된 위치에서 쉴드 TBM의 시공단계에 따라 수평변위해석을 수행하였으며, 그 결과를 그림 3.18 ~ 그림 3.20에 나타내었다.

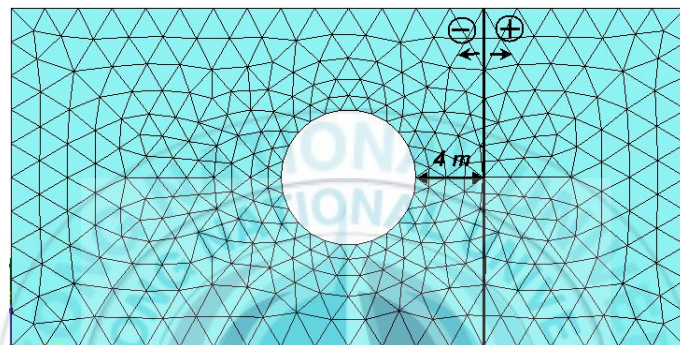


그림 3.17 수평변위 해석구간

그림 3.18는 그림 3.17에 나타난 해석단면에 쉘드기 막장면이 접근하는 단계(시공 3단계)에서 측정한 지반의 수평변위를 쉘드기의 막장압에 따라 나타내었다. 적용된 막장압이 증가함에 따라 터널 중심부가 통과하는 지점에서 이격된 지점에서의 수평변위가 양의 방향으로 점차 증가함을 보이고 있다. 이는 쉘드 TBM의 굴착에 따라 터널인접지반의 응력이 방사형으로 전이되어 이러한 수평변위에 기인한 것으로 판단되며, 이때 쉘드기에 발생하는 막장압은 이러한 토압의 전이를 더욱 활성화하여 결국 그래프에 제시된 변위를 유발한 것으로 판단된다.

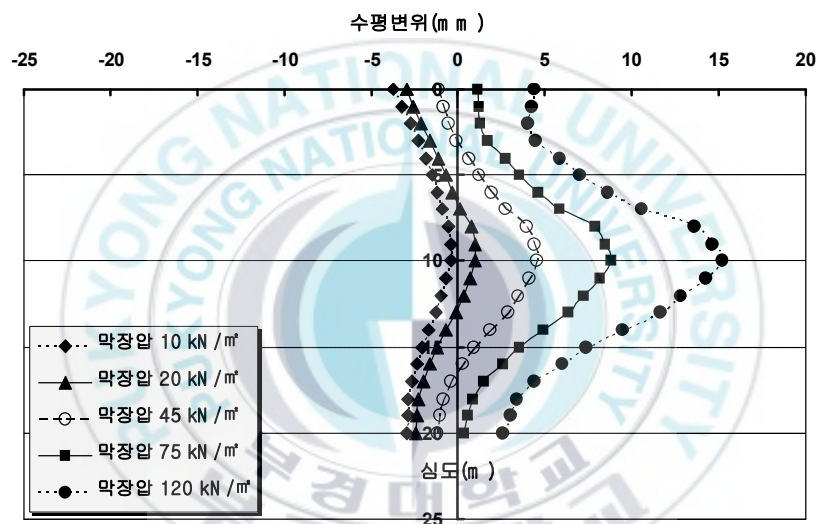


그림 3.18 수평변위(시공 3단계-쉘드막장면 접근시)

그림 3.19는 쉴드기의 테일부를 통과해서 그라우트압이 주입되는 단계(시공 8단계)에서 발생하는 수평변위를 다양한 막장압에 관해서 나타낸 그래프이다. 쉴드 TBM에 의해 터널이 굴착되고 라이닝이 설치되면서 굴착면의 응력해방에 의해 지반이 터널쪽으로 이동하면서 발생한 수평변위로 판단된다. 또한 그림 3.19의 그래프는 막장압의 증가와 함께 전체적인 변위가 감소하는 경향을 보이는데 이러한 경향은 쉴드 TBM 적용시 기존 지중 구조물에 영향을 평가하기 위한 수단으로 쉴드 TBM에 적용되는 막장압이 일부 고려되어야 한다고 판단된다.

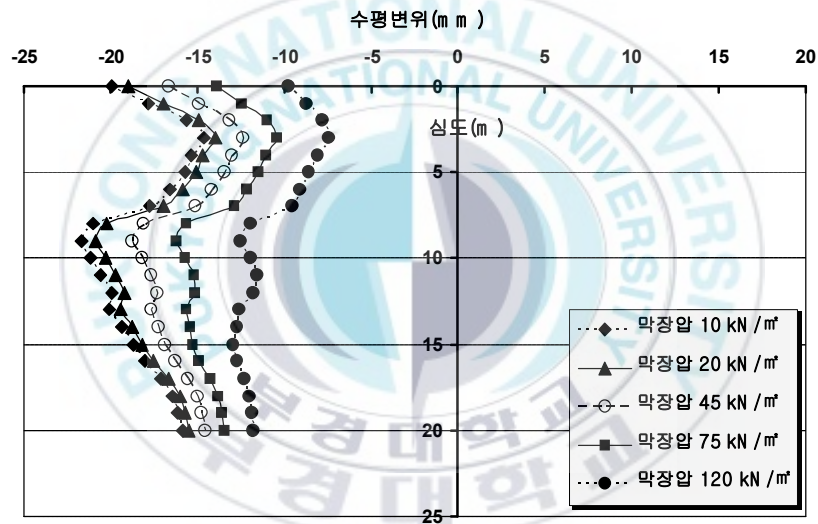


그림 3.19 수평변위(시공 8단계-그라우트압 작용시)

그림 3.20는 테일보이드에 그라우트압이 주입되는 단계(시공 8단계)에서 해석단면의 수평변위를 다양한 그라우트압에 따라 나타낸 그래프이다. 최대 변위 지점인 터널중심에서 해석단면으로 이격된 지점(심도 10.0 m)에서의 변위 값을 표 3.9에 정리하였다. 본 시공단계에서 주입되는 그라우트압이 증가함에 따라 수평변위가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이상의 결과는 쉘드기가 테일보이드를 통과해서 라이닝과 지반에 그라우트재가 주입되는 단계에서 그라우트 주입압에 의해 지반쪽으로 가해지는 압력에 기인한 것으로 판단된다. 이러한 그라우트 주입압에 의해 테일보이드 내로 수평변위를 구속함으로써 테일보이드내에 추가적인 지반붕괴를 방지하는 개념을 확인할 수 있었다.

표 3.9 그라우트압에 따른 수평변위(터널측벽부에서 4.0 m 이격지점)

구분		수평 변위(mm)
작용 그라우트압	120 kN/m ²	-21.1
	140 kN/m ²	-20.1
	200 kN/m ²	-17.6
	250 kN/m ²	-16.1

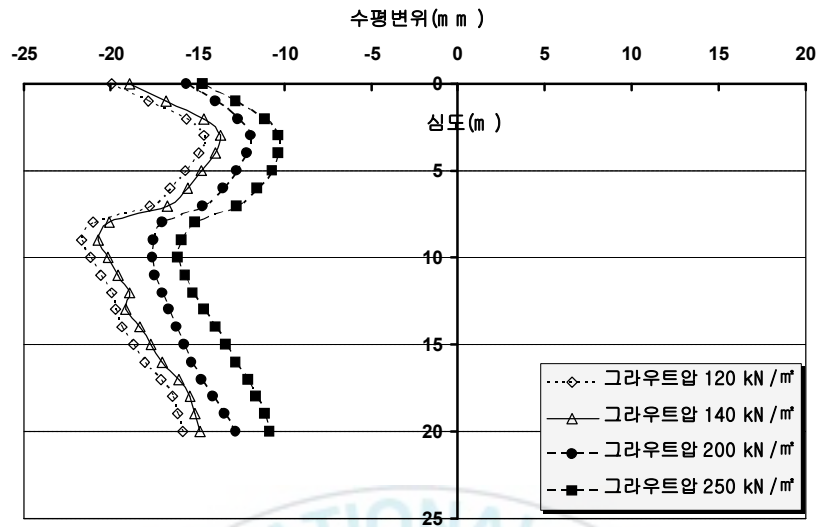


그림 3.20 그라우트압 주입시 수평변위
(막장압 10 kN/m² 작용시)

3.4.3 터널 라이닝의 변형 거동

1) 천단부 변위

그림 3.21은 라이닝 설치 시공단계(시공 7단계) 이후 계속되는 터널 굴착단계에 따라 설치된 라이닝의 천단부에서 발생하는 수직변위를 나타내고 있다. 여기서 쉼트기 내에서 조립된 라이닝이 쉼트기의 테일부를 통과하는 과정(시공 8 ~ 시공 9단계)에서 테일보이드에 의해 두드러진 침하 경향을 보이고 있다.

표 3.10는 그림 3.21의 그래프에서 쉼트기 내에서 조립되는 단계(시공 7단계)에서 조립된 라이닝이 테일보이드에 이동되는 단계(시공 8단계)를 거쳐 테일보이드내 주입된 그라우트재의 경화(시공 11단계)되면서 발생하는 라이닝 천단부의 일련의 침하량을 도표화하였다. 그리고 각 단계에서 변위 증감량을 추가로 나타내었다. 그림 3.21와 표 3.10로부터 막장압이 증가함에 따라 조립

된 라이닝이 테일부 구간(시공 7단계)에서 뒤채움 그라우트재가 주입되는 단계(시공 8단계)를 거치는 과정에서 발생하는 침하증감량은 소폭으로 증가하는 경향을 보였다. 그리고 이후에 뒤채움 그라우트의 주입후 경화하는 단계(시공 11단계)의 증감량은 막장압이 증가할수록 소폭 감소하는 경향을 보였다. 이는 막장압에 의해 발생한 지반내의 잔류응력이 터널 중심방향으로 방사형을 작용하면서 라이닝의 천단부에 이와 같은 영향을 미친 것으로 판단된다.

표 3.10 라이닝 설치 이후 시공단계별 라이닝 천단부 변위량

구 분	설트기내에서의 라이닝 조립단계 (시공 7단계)	조립된 라이닝이 테일보이드에 이동되는 단계 (시공 8단계)	테일보이드내에 그라우트의 주입 및 경화단계 (시공9단계~ 시공17단계)
막장압 10 kN/m ²	-79.13 mm	-114.41 mm	-84.07 mm
	35.28 mm 증가	30.34 mm 감소	
막장압 18 kN/m ²	-74.32 mm	108.09 mm	-81.61 mm
	33.77 mm 증가	26.48 mm 감소	
막장압 20 kN/m ²	-73.12 mm	-107.26 mm	-80.99 mm
	34.14 mm 증가	26.27 mm 감소	
막장압 45 kN/m ²	-58.09 mm	-96.87 mm	-73.30 mm
	38.78 mm 증가	23.57 mm 감소	
막장압 75 kN/m ²	-40.05 mm	-84.40 mm	-64.08 mm
	44.35 mm 증가	20.32 mm 감소	
막장압 120 kN/m ²	-12.98 mm	-65.71 mm	-50.24 mm
	52.73 mm 증가	15.47 mm 감소	

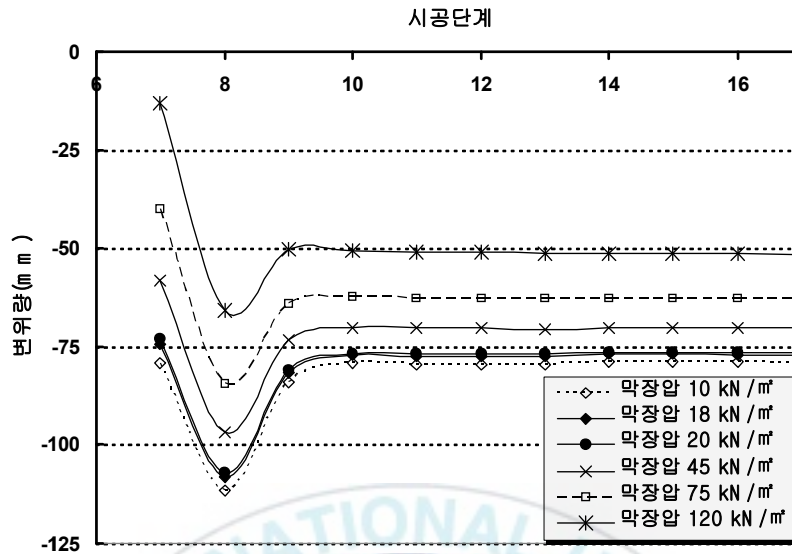


그림 3.21 시공단계별 천단부 변위
(그라우트압 120 kN/m² 작용시)

2) 바닥부 변위

그림 3.22는 라이닝 설치 시공단계(시공 7단계) 이후 계속되는 터널 굴착단계에 따라 설치된 라이닝의 바닥부에서 발생하는 수직변위를 나타내고 있다. 여기서 쉴트기 내에서 조립된 라이닝이 쉴트기의 테일부를 통과하는 과정(시공 8 ~ 시공 9단계)에서 테일보이드에 의해 용기되는 현상을 보이고 있다.

표 3.11는 표 3.10과 동일한 방법으로 시공단계에 따른 침하량과 단계별 침하 증감량을 정리한 것으로서, 쉴트기 내부에서 조립된 라이닝이 테일보이드 구간을 통과하면서 테일보이드 내로 인접토사가 유입되어 라이닝의 바닥부에 상향력을 발생시켜 위와 같은 현상이 발생한 것으로 판단된다. 그리고 막장압이 증가함에 따라 테일보이드 구간에서 위와 같은 거동은 뚜렷하게 발생한다. 앞서 언급한 라이닝 천단부 수직변위의 원인과 동일하게 막장압에 의해 발생한 지반의 응력이 터널중심으로 전이되는 과정에서 상대적으로 취약한 부분으로 평가되는 테일보이드 구간에서 라이닝에 직접적으로 영향을 미친것이

라 판단한다.

표 3.11 라이닝 설치 이후 시공단계별 라이닝 바닥부 변위량

구 분	쉴드기내에서의 라이닝 조립단계 (시공 7단계)	조립된 라이닝이 테일보이드에 이동되는 단계 (시공 8단계)	테일보이드내에 그라우트의 주입 및 경화단계 (시공9단계~ 시공17단계)
막장압 10 kN/m ²	78.27 mm	69.78 mm	52.0 mm
	8.49 mm 감소	17.78 mm 감소	
막장압 18 kN/m ²	75.02 mm	68.97 mm	51.73 mm
	6.05 mm 감소	17.24 mm 감소	
막장압 20 kN/m ²	74.21 mm	68.77 mm	51.67 mm
	5.44 mm 감소	17.10 mm 감소	
막장압 45 kN/m ²	64.07 mm	66.23 mm	50.83 mm
	2.16 mm 증가	15.40 mm 감소	
막장압 75 kN/m ²	51.90 mm	63.19 mm	49.83 mm
	11.29 mm 증가	13.36 mm 감소	
막장압 120 kN/m ²	33.64 mm	58.63 mm	48.33 mm
	24.99 mm 증가	10.30 mm 감소	

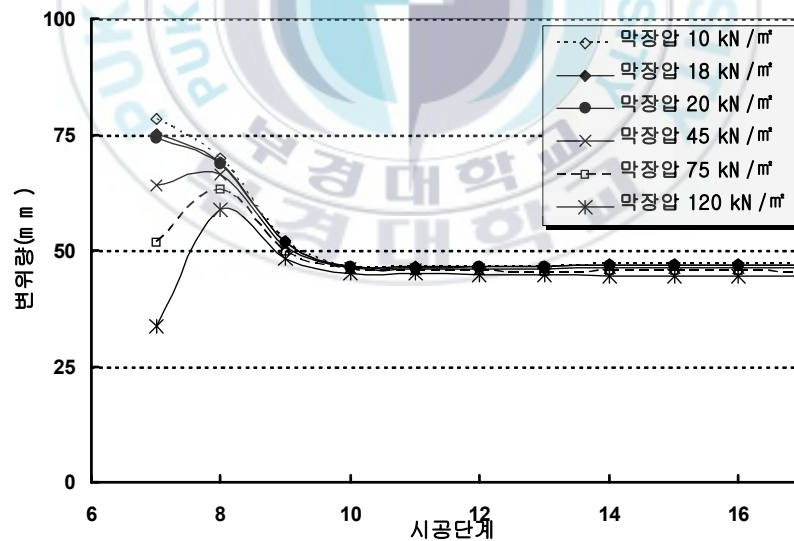


그림 3.22 시공단계별 바닥부 변위
(그라우트압 120 kN/m² 작용시)

제 4 장 결 론

본 연구에서는 시공단계를 고려한 쉘드 TBM의 거동 특성을 수치해석기법을 이용하여 평가하였다. 프로그램의 검증은 위하여 1999년 영국에서 쉘드 TBM을 적용하여 테임즈 강 하부를 관통하여 Island Garden Station과 Greenwich 터널에 대한 지반거동 변화 현장 계측치를 해석결과치와 비교하였다. 이와 같이 검증된 3차원 수치해석 프로그램을 이용하여 쉘드굴진시 막장압, 테일보이드 그라우트 주입압의 변화에 따른 지반거동특성을 평가하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 쉘드 TBM의 막장압이 크면 지표면 융기가 크지만, 라이닝 설치 후의 지표면 침하는 작게 되고, 막장압이 작으면 융기는 작지만 라이닝 설치 후의 지표면 침하가 커지게 되므로 터널 시공시 막장압력의 변화에 따른 융기조절로 지반거동에 대한 시공관리를 할 수 있다.

2) 쉘드 TBM의 테일보이드 내로 주입되는 뒤채움 그라우트재의 주입압이 증가할수록 지표면에서 측정한 침하량은 감소하는 것으로 나타나고 계속되는 시공과정에서 그라우트재 경화 이후 최종침하량에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그래서 쉘드 TBM을 적용한 터널굴착시 테일보이드내로 주입되는 그라우트재의 주입압의 변화에 따른 침하량 조정으로 최종 지반거동에 대한 시공관리를 할 수 있을 것으로 판단한다.

3) 쉘드터널 시공시 터널 상부 지반의 연직변형 뿐 아니라 터널 측면에서의 수평방향 변형도 시공과정에서 발생하는 막장압과 그라우트압에 의해 상이한 결과를 도출할 수 있었다. 그러므로 지하 구조물 또는 깊은 기초에 근접하여 시공할 경우에는 막장압과 그라우트압의 변화에 대한 지반의 연직변형뿐

아니라 수평변형도 고려되어야 한다.

4) 쉴드 TBM 적용시 쉴드기 내부에서 조립된 라이닝이 테일보이드 구간에 위치하여 그라우트재의 경화하면서 라이닝의 천단부 및 바닥부에서 발생하는 일련의 침하를 막장압과 그라우트압의 변화에 따라 관찰하였다. 그 결과 테일보이드 영역내에서의 천단부의 침하 및 바닥부의 융기 현상이 두드러지게 나타났다. 이것은 막장압에 의해 발생한 지반내의 잔류응력이 터널 중심을 향하여 방사형으로 작용하면서 라이닝에 영향을 미친 것으로 판단한다. 그러므로 시공시 라이닝의 변형을 최소화 할 수 있는 막장압과 그라우트압의 조절이 고려되어야 한다.



참 고 문 헌

1. 정경환, 유창도, 조성호, 황부성, 한경태, 김태효, 정두희(2004) 일본과 국내의 실드세그먼트 경향비교, 한국터널공학회, 정기 학술대회 논문집, pp.175~196.
2. Thomas Kasper, Gunther Meschke(2005) On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling, Tunnelling and Underground Space Technology, No. 21(2006), pp.160~171.
3. Thomas Kasper, Gunther Meschke(1980) A numerical study of the effect of soil and grout material properties and cover depth in shield tunnelling, Computers and Geotechnics, No. 33(2006), pp.234~247.
4. G. Galli, A. Grimaldi, A. Leonardi(2004) Three-dimensional modelling of tunnel excavation and lining, Computers and Geotechnics, No. 31(2004), pp.171~183.
5. International Tunnelling Association Working Group No. 2.(2000) Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 15, No. 3, pp.303~331.
6. Richard J. Finno, G. Wayne Clough(1985), Evaluation of Soil Response to EPB Shield Tunneling(1985) Journal of Geotechnical Engineering, Vol 111, No. 2, pp.155~173.

7. H. Mroueh, I. Shahrour(2002) A full 3-D finite element analysis of tunneling - adjacent structures interaction, Computers and Geotechnics, No. 30, pp.245 - 253.
8. Kazuhito Komiya, Kenichi Soga(1999) Finite Element modelling of excavation and advancement processes of a shield tunnelling machine, Soils and Foundations., Vol. 39, No. 3, pp.37~52.
9. Muir Wood, A.M.(1975) The Circular Tunnel in Elastic Ground, Geotechnique, Vol. 25, No. 1, pp. 115-127.



감사의 글

응용토질연구실과 인연을 맺은지 2년이란 세월 속에 힘든 나날과 보람찬 일들이 서로 조화를 이루어 본 논문의 결실을 이루게 되어 한없는 기쁨을 느끼며, 새삼스레 많은 분들의 고마움을 다시 떠올리게 됩니다.

항상 부족한 제자를 하늘만큼 넉넉한 마음으로 이해와 관용을 베풀어주시고, 논문에 완성되기까지 아낌없는 지도를 베풀어주신 정두희 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 바쁘신 일정 속에서도 부족한 저의 논문을 심사하시고 항상 자상하고 인자하게 학문의 길을 인도해 주신 이영대 교수님, 정진호 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 무언의 꾸지람과 너그러운 미소로 가르침을 아끼지 않으신 손인식 교수님, 이동욱 교수님, 장희석 교수님, 김명식 교수님, 이종섭 교수님, 이종출 교수님, 극승규 교수님, 이환우 교수님, 이상호 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

아울러 지금까지 연구실에서 가족처럼 스스럼없이 도와준 애숙누님, 종철형님, 도영형님, 찬우, 민정, 창우, 일묵이에게도 고마움을 전합니다. 그리고 어렵고 힘든 때에 항상 곁에서 힘이 되어준 정민이형, 태석이, 미은이와 함께 논문을 쓰며 힘든 일을 같이 해온 2년차 동기들에게 감사드리며, 또한 토목공학과를 이끌어 갈 여러 연구실 후배들에게 고마움을 전합니다.

힘이 들어도 오빠를 위해 내색하지 않으며 항상 힘이 되어준 하나밖에 없는 사랑스런 동생 혜경이에게 고마움을 전하며, 지금까지 바쁘다는 핑계로 아들 노릇을 제대로 못했지만, 항상 믿음과 격려로써 아들 뒷바라지 해주신 나의 위상 아버지, 어머니의 끝없이 깊은 사랑에 감사드리며, 그 은혜에 조금이나마 보답하고자 이 논문을 바칩니다.