

2차원 탄소성해석에 의한 밀폐형 실드터널의 거동에 관한 연구

The Study on the Behavior of Closed-Faced Shield Tunneling by Two Dimensional Elasto-Plastic Analysis

진 치 섭*
Jin, Chi-Sub

이 홍 주**
Lee, Hong-Ju

한 상 중**
Han, Sang-Jung

요 약

최근 10여년간 터널 막장면에서 연속적인 지지가 가능해진 연약 점토지반에서의 실드터널 시공법이 개발되었다. 이러한 실드공법은 굴착시 융기단계가 조절될 수 있으므로 테일보이드 내부로 토사의 이동을 감소시키는 데 많은 도움을 줄 수 있다. 본 논문에서는 이러한 밀폐형 실드의 일종인 슬러리 실드와 토압식 실드의 계층치를 이용하여 실드터널 해석을 위해 개발된 2차원 탄소성 프로그램 EPSHILD에 적용시켜 검증하였다. 보다 정확한 해석수행을 위해 시공단계에 상응하는 굴착단계를 결정하였고 융기하중과 하중분담률을 고려하였다. 본 연구는 실드 시공과정에서 발생하는 즉시침하에 근거를 둔 것이며 장기침하에 대해서는 고려하지 않았다.

Abstract

In the past decade soft clay shield tunneling technology have been improved to permit continuous support to the face of a tunnel. These advanced shield can be operated such that an initial heaving is created, this helps to decrease the inward soil movement into the tail void. In this paper, the measurement of slurry shield and EPB shield were used and two dimensional elasto-plastic programs EPSHILD developed for shield tunnel analysis were approved. The excavation steps corresponding with construction stages were settled and heaving load, load factors were considered. This study is based on the instantaneous settlement which is occurred in the process of shield construction but not the secondary settlement by consolidation.

Keywords : advanced shield tunneling, tail void, excavation steps, construction stages, heaving load, load factors

1. 서 론

실드터널에 대한 연구는 경험적 방법, 반경험적 방법, 물리적 모형실험 방법 그리고 이론적 방법

등 크게 4종류로 구분되어 연구되어 왔으며, 실드터널 시공시 주변지반의 거동에 대한 연구는 Roscoe & Burland¹⁾, Johnston⁷⁾, Finno¹⁾, Shirasuna¹²⁾ 등에 의해 흙의 점착력, 간극수압의 생성과 소멸

* 부산대학교 토목공학과 교수

** 부산대학교 토목공학과 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 1997년도 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1997년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

그리고 압밀에 관하여 진행이 되어 왔으나 아직 정확한 지반거동을 나타내는 모델은 찾아보기가 어려운 실정이다.

본 연구에서는 실드터널 시공시 발생하는 전체 침하량 중 즉시침하량(1차침하량)을 예측하기 위해 탄소성이론^{1),9)}을 이용한 실드전용 탄소성 프로그램을 개발하였으며 시공과정을 잘 반영할 수 있도록 해석과정을 단계별로 분류하였다. 그리고 실드굴진에 따른 지반변형효과가 정확히 표현될 수 있게 각 단계마다 등가굴착력에 대한 하중분담률을 적절하게 조절하였다. 또, 전단면 굴착단계(1 STEP)에서는 초기 굴착시 지반의 용기변형 효과를 고려하기 위해 타원분포 형태의 용기압을 적용하였다.

본 해석에서는 시공당시의 즉시침하에 근거를 두고 있으며 압밀에 의한 장기침하는 고려하지 않았다. 본 연구에서 개발된 2차원 탄소성 실드전용 프로그램 EPSHILD는 실드터널 시공과정에서 발생하는 즉시 침하량을 예측하는 데 있어서 지반상태를 간단히 모델링하여 쉽게 적용시켜 볼 수 있는 자료로 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

2. 실드터널 공법과 해석과정

2.1 실드터널 공법

실드터널 공법은 연약지반에 터널을 굴착할 때 소요되는 많은 경비와 작업의 어려움 그리고 항상 붕괴의 위험성이 뒤따르는 일반터널 공법에 대한 터널 대체공법이다. 실드터널 공법은 터널의 외경보다 약간 큰 내경을 가진 견고한 강재의 실드를 잭 등으로 밀면서 연약한 지중에 추진시켜 전면지반을 기계 앞쪽의 회전굴착부에 부착된 각종칼타를 이용하여 굴착을 하고, 테일부 내에서 세그먼트를 축조하여 실드기를 앞으로 밀어내어 세그먼트와 원 지반 사이의 테일보이드를 뒷채움하는 과정으로 반복되며, 세그먼트가 터널에 작용하는 하중을 지보하는 형식으로 터널을 완성해 가는 것이다.

2.2 실드시공시 굴착단계의 결정

실드터널은 실드기계의 종류와 굴진속도, 추진

력 등의 여러 요인에 따라 굴착시 발생하는 주변 지반의 거동이 다르게 나타난다. 일반적으로 터널을 굴착할 때의 지반거동은 2차원이 아니고 3차원 거동을 하므로 터널 굴착과정을 2차원으로 모델링하기 위해서는 실제 시공시 발생하는 시공단계를 정확하게 고려해야 하는 것이 해석수행에 있어 무엇보다도 중요한 요소가 될 것으로 판단된다.

이러한 시공단계를 고려할 때 중요한 것은 전면부가 막힌 밀폐형 실드는 실드가 굴진함에 따라 주변지반이 용기한다는 것이며, 이러한 작용으로 실드터널에서 발생하는 침하와 수평거동에 많은 영향을 미치게 된다. 밀폐형 실드에서 발생하는 용기효과와 시공당시 발생하는 지반의 단기거동을 정확히 해석하기 위하여 해석 수행시 고려해야 될 사항은 다음과 같다.

① 초기용기와 테일 보이드 폐합에 따른 지반거동의 고려

② 세그먼트 설치와 테일보이드 폐합 후의 세그먼트 쪽으로의 응력이동 고려

또 굴착시 막장에 작용하는 등가굴착력을 각 단계마다 적절히 분담하는 것이 지반거동을 보다 잘 표현하기 위해 효과적이라 할 수 있을 것이다.

2.3 실드터널의 시공시 지반침하

실드공법에 있어서 지반 변위형상을 파악하고 그 정도를 예측하여 지반의 변위를 방지하는 것은 공사를 진행하는 데 있어 극히 중요한 사항이라 할 수 있다. 실드굴착에 따른 지반 변위형상을 알고 그 예측법을 찾아내는 데는 크게 다음 2가지의 목적이 있다.

① 근접구조물에서의 영향을 사전에 파악하여 적당한 대책공법을 수립한다.

② 동태계측결과로 시공의 적부를 판정하여 시공방법을 개선한다.

①은 실드공사 이외의 토목공사에서도 행하는 것으로 사전예측과 영향평가 및 기존 구조물의 허용치를 만족하는 대책공법을 수립하는 것이다. 또, 예측결과로부터 실드 시공관리의 지표를 결정한다. ②는 시공시 실드의 공정에 맞추어 현장계측을 실시하고 그 결과로부터 다음단계의 시공방법과 공정을 개선한다. 이는 실드의 진행에 따라

서 생기는 지반 변위곡선의 형상을 분석함으로써 시공의 적부를 판정할 수 있기 때문이다.

터널의 지표면 침하에 대한 문제점은 Peck¹⁰⁾, Cording & Hansmire³⁾, Clough & Schmidt²⁾ 등이 연구하였다.

실드굴진에 따른 일반적인 지표면 침하형상이 그림 1에 나타나 있다. 실드가 접근함에 따라 지반은 초기에 융기하지만, 실드가 통과한 다음에는 침하가 발생한다. 이것은 스킨 플레이트가 빠져 나간 후 생긴 테일보이드를 줄이기 위해 토사가 세그먼트 쪽으로 이동하기 때문이고 대부분의 침하는 즉시 발생한다. 표 1은 침하의 종류와 원인 그리고 변형기구를 나타낸 것이다.

표 1 지반 변형기구

침하의 종류	원인	지반상태	변형기구
① 선행침하	지하수위저하	유효토포압의 증가	압축·압밀 침하
② 막장 전 침하, 융기	막장붕괴, 막장 압의 과대적용	지반의 응력이완 및 교란 부하도압	탄소성 변형
③ 테일침하	실드기 통과시 흙의교란	교란	압축
④ 테일보이드 침하	테일보이드의 발생	지반의 응력이완	탄소성 변형
⑤ 후속침하	압밀	침하	압밀, 크리프 침하

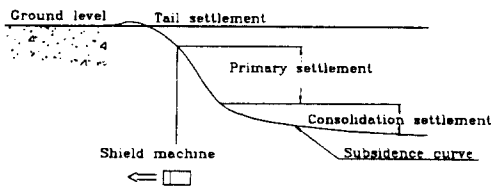


그림 1 실드굴진에 따른 지표면 침하형상

3. 유한요소 해석과정과 프로그램의 구성

3.1 전단면 굴착시 융기효과

밀폐형 실드에서는 굴토된 흙이 실드의 내부로 들어가지 못하도록 하는 격벽이 있다. 이 격벽은 막장면에서의 작용토압에 저항하는 역할을 한다. 또한 회전 굴착부(rotating cutterhead)도 막장면

을 부분적으로 유지해 준다. 따라서 막장면의 안정은 여러 가지 부가적인 방법을 사용하지 않고도 유지된다. 만일 이러한 막장부의 안정상태가 교란 되면 이는 막장 주변지반의 심한 변형과 지반의 침하를 초래하게 된다.

밀폐형실드에서 막장면을 유지해 주는 막장안정기구의 형성은 실드굴착시 벽면으로 융기압이 작용하는 것과 같은 효과를 가지며 이는 가해지는 융기압으로 토압에 저항하여 막장의 변형을 억제하고 지반침하를 제어하는 역할을 한다. 그리고 이를 위해서 격벽 내의 압력을 조절하는 것이 무엇보다도 중요하다.

시공시 발생하는 막장부 융기효과를 해석에 적용하기 위해서는 막장압의 크기와 형태를 신중히 검토해야 하는 데 이는 실제 실드가 적용되는 현장조건이 우리가 고려할 수 없는 아주 복잡하고도 다양한 조건을 나타내고 있다는 것이며 이 때문에 해석에 적용하는 융기압의 크기 및 형태는 해석자가 경험적으로 추정하여 결정해야 하는 상당히 섬세한 부분이라 판단된다. 본 연구에서 경험해 본 바에 따르면 이것이 다음 단계의 해석결과에 미치는 영향이 많았으므로 많은 해석적 경험과 실제 시공시의 계측결과를 비교 검토함으로써 좀 더 합리적인 추론을 할 수 있겠다고 생각된다.

3.2 하중 분담률

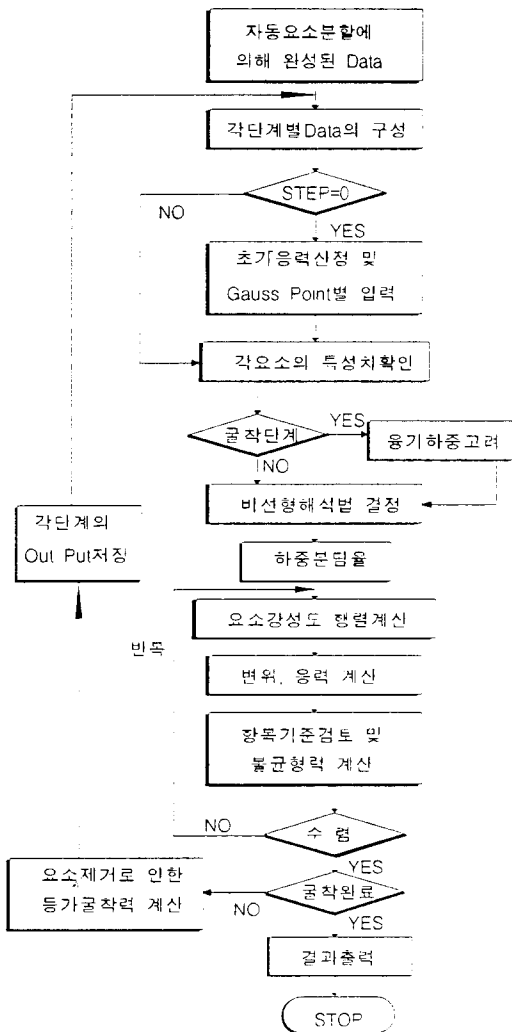
원 지반상태에서 굴착을 시작함과 동시에 막장면의 응력은 불균형 상태가 되고 굴착면 주위로 불평형력이 발생하게 된다. 이러한 불평형력의 작용은 실제 어느 정도의 크기로 어느 단계에서 작용하는지는 정확히 알 수가 없고 이를 2차원 해석에 반영하기 위해 각 해석단계마다 등가 굴착력을 적절히 분배하는 것이 굴착시 막장 응력효과를 보다 잘 표현하기 위해 효과적이라 할 수 있을 것이다. 이러한 하중분담률의 개념은 일반터널의 해석시에도 종종 사용하는 해석기법으로서 그 사용의 한계치가 불명확하며 앞서 서술한 융기압 부분에서와 같이 해석자가 경험적으로 결정해야 할 부분이다. 본 연구에서는 각 해석단계마다 하중 분담률을 고려하였고, 특히 Finno⁴⁾와 Shirasuna¹²⁾의

방법과는 조금 다르게 테일 보이드 폐합단계에서는 폐합하중을 적용하지 않고 등가굴착력에 대한 하중 분담률만을 조절하였다.

3.3 프로그램의 구성

본 프로그램 EPSHILD는 탄소성이론을 이용하고 실드굴착시 발생하는 시공과정을 해석과정에 정확히 반영할 수 있게 작성한 실드전용 탄소성 유한요소 프로그램이다.

MAIN 부의 흐름도



3.3.1 데이터의 구성(자동요소분할 기법)

자동요소 분할기법을 사용하여 데이터를 구성한 후, 이를 컴퓨터 그래픽에 의해 검증할 수 있도록 하여 요소분할 및 좌표의 생성에 있어 발생할 수 있는 오류를 방지하였다.

3.3.2 Main 부

자동요소 분할기법에 의해 완성된 데이터는 각 단계별 요소특성에 맞게 약간의 수정을 실시한 후 탄소성 해석을 시작하게 되는 데 굴착시 응기효과를 프로그램에 적용하기 위하여 1 STEP(굴착단계)에서 타원분포 형태의 응기하중을 고려하였다. 그리고 굴착이 되기 이전 단계(0 STEP)에서 미리 등가굴착력을 계산하여 저장을 한 후 1 STEP부터 이에 대한 하중분담률을 적용하였다.

비선형 해석법은 초기강성도법, 점선강성도법 그리고 이 두가지를 혼합하여 사용하는 복합법의 3가지 방법을 선택적으로 사용할 수 있도록 하였으며, 항복기준도 Mohr-Coulomb 기준과 Drucker-Prager 기준을 선택적으로 사용할 수 있도록 하였다. 그 전체과정을 왼쪽 흐름도에 개략적으로 표시하였다.

4. 수치 예 및 고찰

4.1 개요

본 연구에서는 실드터널 시공시 발생하는 전체 침하량 중 압밀을 제외한 즉시침하, 즉 막장에 도달하기 직전의 지반의 응기 그리고 막장 도달 후에서부터 테일 보이드 폐합시까지의 지반침하에 대한 거동을 빠르고 간단한 방법으로 유추하기 위해 2차원 탄소성 실드전용 프로그램에 의한 해석 기법을 마련하였다. 프로그램의 검증에 위하여 실측자료 두가지를 선택하여 본 연구의 해석결과와 비교 검토하여 보았다. 선택된 두 자료는 지반조건이 다소 상이한 점을 지니고 있어 본 프로그램의 타당성을 검증하는 데 있어 효과적이라 볼 수 있다.

첫번째로 선택한 자료는 국내에서 시공 중인 마산시 지중 전력구 공사의 실측자료를 선정하였는데 이곳은 1995년 4월부터 공사가 시작되어 1996년 10월 15일 현재 시공연장 260m의 공정을 보이

고 있었으며, 계측자료가 타 지역에 비해 양호하여 이 계측치를 선택하였다. 단지 신뢰할 만한 계측위치가 한 군데 밖에 되질 않아 폭 넓은 비교는 수행될 수 없었다.

두번째로 선택한 자료는 일본 동경 중심가의 A급하천 아래를 통과하는 터널에서의 계측자료인데, 최초로 슬러리실드가 적용된 터널이다. 이 자료는 NTT(Nippon Telegraph and Telephone Coporation)에서 계측을 실시하였고, Murakami 등⁸⁾이 유한요소에 의해 해석을 수행하였다. 서술의 편의상 국내의 계측자료에 대한 터널을 KMS 터널이라 하였고 일본의 계측자료에 대한 터널은 NTT터널이라 하였다.

표 2는 KMS터널과 NTT터널의 해석단면에 대한 지층 물성치를 나타낸 것이다.

표 2 해석 대상단면의 지층별 물성치

지층 기호	재료 성질	E (tf/m ²)	ν	γ_t (tf/m ³)	c (tf/m ²)	ϕ (°)	비고
K M S	토사층	2,000	0.33	1.75	5	25	
	풍화토	2,500	0.33	1.75	10	30	
	풍화암 및 연암층	50,000	0.30	2.05	10	35	터널 통과층
N T T	As	460	0.49	1.93	0	25	
	Ac	1,080	0.49	1.63	5	0	
	Dc1	2,300	0.48	1.75	8	5	터널 통과층
	Dc2	3,700	0.48	1.77	10	10	
	Ds3	8,000	0.47	2.17	0	40	

4.2 지층의 모델링

4.2.1 KMS 터널

터널이 위치한 지역의 평면도 및 해석대상 단면의 지층구조가 그림 2에 나타나 있다. 본 터널의 전체길이는 2330m이고 터널 굴착경은 3.51m, 전체터널에 대한 토피는 7.0m~8.0m이며 해석대상 단면의 토피는 7.35m, 테일보이드는 13cm, 세그먼트 두께는 20cm 이었다. 계측은 터널중심의 지표면에서 4.0m, 7.0m 깊이에 각각 설치된 지중침하계를 이용하여 실시하였는데 지중 7.0m의 계측치는 계측상의 착오를 일으켰으므로 해석결과와

의 비교에서 제외하였고 지중 4.0m의 계측치를 해석결과와 비교 검토하였다.

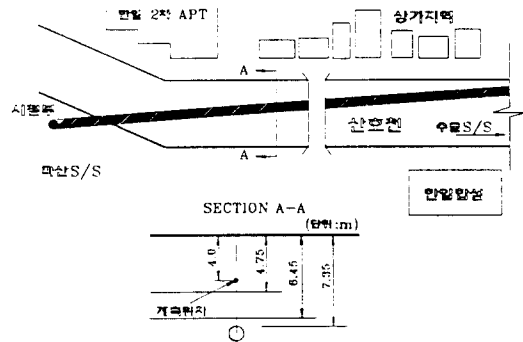


그림 2 KMST터널의 평면도 및 단면도

계측결과를 실드기가 측정점으로 부터 수심m 떨어진 곳에서 부터 측정점을 상당히 지나간 후까지의 경시변화에 따른 지반변위였으며, 본 해석과 비교한 계측치는 실드기가 측정점 아래 도달하기 직전(해석단계에서 1 STEP에 해당)과 실드기가 측정점을 빠져 나간 후(해석단계에서 2 STEP에 해당)에 해당되는 부분이다.

4.2.2 NTT 터널

해석대상 단면의 지층구조와 계측위치 그리고 터널이 위치한 지역의 평면도가 그림 3에 나타나 있다. 본 터널의 전체길이는 1586m이고 굴착경은 3.73m, 그리고 전체터널에 대한 토피는 33.7m~38.6m이며 해석대상 단면의 토피는 38.14m, 테일보이드는 6.5cm, 세그먼트 두께는 15cm 이었다. 터널의 계측은 터널 종방향으로 S1~S9의 9개소(10m 간격), 단면 A-A(S5)에서 터널 횡방향 지표면으로 S10~S13의 4개소(10m 간격), 그리고 역시 단면 A-A의 S5 위치에서 지중깊이에 따라 D1~D7의 7개소에 대하여 실시되었다.

본 터널의 계측은 용기단계에 대한 계측치는 없고 테일이 지나간 후(해석단계에서 2 STEP에 해당)와 실드기가 완전히 통과한 5일 후(해석단계에서 3 STEP에 해당)의 계측치가 제시되었다. 테일이 지나간 직후는 단면 A-A의 지표면 5개소(S5, S10~S13), 그리고 실드기가 완전히 통과한 5일

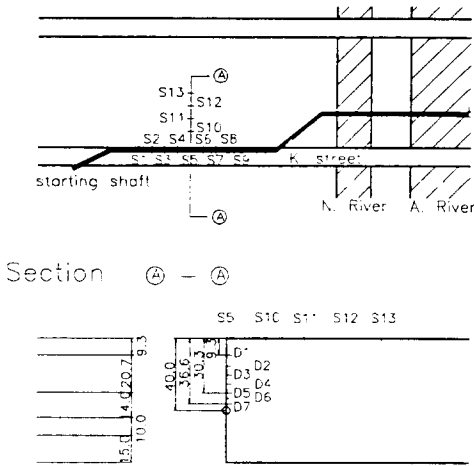


그림 3 NT터널의 평면도 및 단면도

후는 지층깊이별 7개소(D1~D7)에 대하여 계측이 실시되었으며 이를 해석결과와 비교하였다.

이상 두 예제의 터널해석에 사용한 항복기준은 Drucker-Prager 기준이며 비선형 해석법은 초기 강성도법과 집선강성도법을 병행한 복합법을 사용하였다.

4.3 굴착단계를 고려한 해석과정

시공과정을 해석에 반영하기 위해 굴착단계를 다음의 4단계로 결정하였다.

- 0 STEP : 원지반 상태 단계
- 1 STEP : 전단면 굴착 및 용기단계
- 2 STEP : 테일보이드 폐합단계
- 3 STEP : 세그먼트 설치 및 뒷채움 주입단계

실드터널의 3차원 거동을 2차원 수치해석으로 표현하기 위해서는 합리적인 하중분담률 개념의 도입이 필요하다. 이러한 하중분담률의 모델링 방법에는 다중요소법(stiffness variation method)¹³⁾, 응력분배법(stress distribution method)¹³⁾, 내부압력에 의한 법^{5),6)} 등이 있다. 이 중 가장 합리적이고 현실성있는 방법으로 알려진 내부압력에 의해 하중분담률을 조절하는 방법을 이용하여 본 연구에서 적용하였으며 이에 대하여 간략하게 서술하면 다음과 같다.

굴착을 시작함과 동시에 굴착면 주위로 발생하

는 불평형력을 굴착면의 각 절점에서 구한 후 각 단계별에 대한 분담계수를 결정하고 이를 불평형력에 곱하여 각 단계별 마다 굴착경계면 내부로 압력을 작용시키는 방법이다. 그러나 앞서 3.2절에서 언급한 대로 이러한 불평형력의 작용을 굴착 단계별로 정확히 구분한다는 것은 어려운 일이다. 본 연구에서 결정한 하중분담률은 많은 시행착오에 의해 구한 결과이며 이 결과를 지층구조별, 물성치 등의 여러요인에 대해서 명확히 규명한다는 것은 상당히 많은 계측결과와의 비교에 의해서 이루어지는 아주 방대한 부분이라 판단된다. 본 연구에서는 개발된 프로그램의 검증을 위해 적절한 하중분담률을 적용하였으며, 이는 실드의 전 공정으로 이루어 볼 때 초기의 시공과정에서 실측을 수행하고 이 계측치에 해당하는 하중분담률을 빠르고 간편하게 산정함으로써 다음단계의 시공과정에서 이를 이용하여 발생하는 변위를 예측할 수 있다는 것에 그 의미를 두고 있다. 두 터널에 적용한 하중분담률은 표 3에서 보는 바와 같이 각각 다르게 나타나고 있으며 전단면 굴착단계(1 STEP)에서 용기하중과 함께 적용한 하중분담률이 크면 클수록 다음 단계의 응력증분에 대한 평가에 나쁜 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

또, 막장부의 용기효과를 해석에 적용하기 위하여 실드외경을 따라 분포하중을 재하시켰고 용기압력을, 주변의 토사가 굴착경의 외부 법선방향으로 거동할 수 있도록 작용시켰다. 적용한 용기하중의 분포형태는 Finno⁴⁾와 Shirasuna¹²⁾가 유한요소해석에서 사용하였던 타원분포형태를 선택하였는데 다른 여러 형태의 용기하중을 적용시켜 본 결과, 타원분포형태의 용기하중이 가장 양호한 결과를 나타내게 함을 알 수 있었다. 적용한 용기하중의 크기 및 형태가 표 4와 그림 4에 나타나 있으며 이 부분 역시 많은 시행착오에 의해 결정되었다. 두 터널의 제원 및 물성치 등이 서로 상이함에 따라 용기하중의 크기도 많은 차이를 보이고 있음을 알 수 있었다. 그리고 용기하중 크기 중 t_1 과 t_2 의 비가 두 터널 모두에서 약 1 : 1.3으로 나타나고 있는 데 이는 다른 모든 터널의 해석에서도 적용될 수 있는 것이 아님을 밝혀둔다. 이러한 부분

의 연구는 많은 계측치를 이용한 해석결과에 의해 앞으로 지속적으로 진행되어야 할 것으로 생각된다.

표 3 해석에 적용한 하중분담률(%)

굴착단계 \ 터널명	KMS 터널	NTT 터널
0 STEP	100	100
1 STEP	40	50
2 STEP	55	16
3 STEP	5	34

표 4 해석에 적용한 용기하중의 크기

하중 \ 터널명	KMS 터널 (tf/m ²)	NTT 터널 (tf/m ²)
t ₁	0.93	3.52
t ₂	1.25	4.74

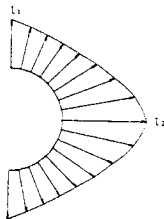


그림 4 해석에 적용한 용기하중의 형태

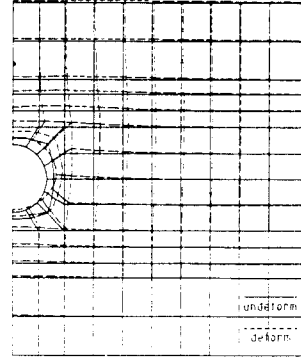


그림 5 KMS 터널의 요소변위 형상도

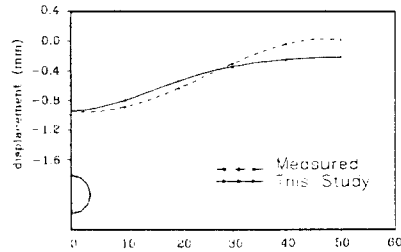


그림 6 NTT 터널의 지표면 변위

4.4 해석결과

4.4.1 굴착 및 용기단계(1 STEP)

KMS 터널에서 터널 직상부의 지표면에서 부터 4.0m 지점의 용기에 의한 수직변위는 해석결과가 0.16mm 이었으며(실측치 : 0.19mm) 본 단계에서 적용한 용기하중의 크기 및 형태는 다음 단계의 해석결과를 고려하여 결정하였다. 이 때의 요소 변위 형상도를 그림 5에 나타내었다.

4.4.2 테일보이드 폐합단계(2 STEP)

테일부가 통과한 후 지반은 테일 보이드를 줄이기 위해 세그먼트 쪽으로 토사가 이동하게 된다. 이의 효과를 해석에 고려해 주기 위한 방법으로 등가굴착력 외에 폐합하중을 작용시키는 경우도 있으나 본 연구에서는 등가굴착력만으로 폐합의 영향을 고려 하였다.

KMS 터널에서 테일보이드 폐합시(2 STEP)

터널 직상부의 지표면에서 부터 지중 4.0m 지점의 처짐은 해석결과가 0.45mm로서 0.68mm의 계측치와 비슷함을 알 수 있었으며 다음으로 NTT터널에서 테일보이드 폐합시(2 STEP) 터널 횡방향 지표면 변위에 대한 해석결과를 그림 6에 나타내었다. 계측위치의 기호는 S5, S10, S11, S12, S13 이다.

4.4.3 세그먼트 설치 및 뒷채움 주입단계

NTT 터널에서는 계측단면 A-A에서 테일부가 통과한 뒤 5일 후의 지중 심도별 침하량이 제시 되어 있으며 이를 본 해석의 마지막 단계(3 STEP) 와 비교하였다. 실측치에서는 지표면에서 30.3m 까지는 각 층별 처짐이 거의 변화가 없다가 터널 천정부와 근접되어 있는 36.6m 지점에서의 처짐량은 거의 두배로 나타나고 있고 본 해석에서의 지중심도별 처짐은 Murakami 등⁸⁾의 해석결과에 서와 같이 지중심도에 약간 비례하는 경향을 나타 내고 있으나 터널천정부 바로 위의 처짐은 Mur-

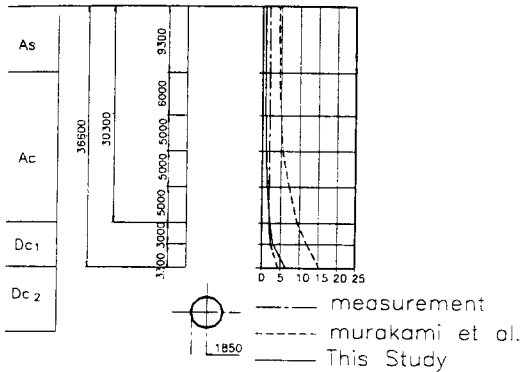


그림 7 NTT 터널의 심도별 침하량

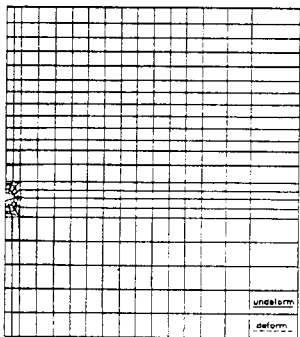


그림 8 3 STEP 에서 NTT 터널의 변위형상도

akami 등의 연구에서 보다 훨씬 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 그림 7에 그 결과를 나타내었으며 그림 8은 최종단계(3 STEP)에서의 NTT 터널에 대한 변위 형상도를 나타내고 있다.

5. 결 론

① 실제 터널의 시공시 챔버 내의 압력은 여러 요인에 따라 변하지만 그 중에서 지반의 물성치 및 토피의 두께 그리고 굴진속도 등이 압력의 결정에 많은 영향을 미친다. 본 연구에서는 이러한 요인을 고려하기 위해 등가굴착력에 대한 하중분담률과 타원분포 형태의 용기하중을 적용하였으며 특히 용기하중에서 타원의 형태는 터널의 측방 변위는 물론이며 터널단면의 횡방향으로 지표면 연직변위에도 많은 영향을 주었다.

② 해석에 적용된 하중분담률과 용기하중의 크기는 해석 수행자가 결정하는 계수로서 이 계수의 정확한 적용이 해석에 상당히 영향을 미친다고 볼 수 있다. 본 연구에서 이들을 적용하여 나타난 결과들이 각 단계별마다 계측치와 잘 일치하고 있음을 볼 때 본 연구에서 개발된 프로그램 EPSHILD의 타당성이 있음을 알 수 있었다.

③ 해석에 적용한 용기하중 및 하중분담률은 본 연구에서 나타난 것처럼 지반의 지층구조 및 물성치 등에 따라 많이 좌우되므로 이에 대한 영향을 정확하게 고려하기 위해서는 많은 현장 실측자료를 빠르고 쉽게 입력, 수정할 수 있는 역해석 기법의 이용이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 93년도 한국과학재단 산학협력연구비(과제번호 93-12-00-01-3) 지원에 의한 연구의 일부로서 재단과 (주)반석건설에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Chen, W. F., ; "Plasticity in Reinforced concrete", McGraw-Hill Book Company, 1982, pp. 3-250.
2. Clough, G. W., B. Schmidt, ; "Design and Performance of Excavations and Tunnels in Soft Clay", A state-of-the-Art paper, *International Symposium of Soft Clays, Bangkok*, 1977.
3. Cording, E. J., W. H. Hansmire, ; "Displacements Around Soft Ground Tunnels", General Report : Session iv, *Tunnels in Soil, 5th Pan-American Buenos Aires*, November, 1975.
4. Finno, R. J., ; "Response of Cohesive Soil to Advanced Shield Tunneling", Ph. D. Thesis, Stanford University, 1983.
5. FLAC-2D ; Manual, Itasca Consulting Group, Inc., Minnesota, U.S.A., 1991.
6. 진치섭, ; "NATM 터널 설계기법 개발에 관한 연구", 자유건설 주식회사 Report, 1992.
7. Johnston, P. R., ; "Finite Element Consolidation Analysis of Tunnel Behavior in Clay",

- Thesis presented to Stanford University in partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy, Stanford, CA, 1981.
8. Murakami, K., Nakano, M., Suzuki, S., Nisio, S., ; "Measurements and Analysis of Ground Deformation for Shield Tunneling Undercrossing a class a River", *Tunnel and Underground works Today and Future*, Proceedings of the International Congress, 1990, pp 357-364.
 9. Owen, D. R. J., Hinton, E., ; "*The finite Elements in Plasticity : Theory and Practice*", Pineridge Press, 1980.
 10. Peck, R. B., ; "Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground", State-of-the-Art Report, *Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, State-of-the-Art volume, 1969, pp. 225-281.
 11. Roscoe, K. H. and Burland, J. B., ; "On the Generalized Stress-Strain Behavior of 'Wet' Clay", *Engineering Plasticity*, Cambridge University Press, 1968, pp. 535-609.
 12. Shirasuna, T.,; "*Finite Element Analysis on Cohesive Soil Behavior Due to Advanced Shield Tunneling*", Ph. D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1985.
 13. Sinha, R.S., ; "Underground Structures -Design and Construction"?, Elsevier, U.S.A., 1991