

BTR공법의 시공단계별 안전성 해석

정 광 모* · 이 원 희** · 이 상 현*** · 방 명 석****

*한국종합기술(주) · **삼보굴착(주) · ***성원기술개발(주) · ****한국교통대학교 안전공학과

A Safety Analysis of the BTR Method by Construction Sequence

Kuang-Mo Chung* · Won-Hee Lee** · Sang-Hyun Lee*** · Myung-Seok Bang****

*Korea Eng. Consultant Corp. · **Sambo Pipe Ramming Co.

Sungwon Eng.& Consultant · *Korea National University of Transportation

Abstract

In this study was conducted numerical analysis to evaluate the stability of BTR(Built-in Timber Roof Tunneling Method), which is one of construction methods of underground structures in the non-opening state. The discretion method was applied to individually model reinforcing members of BTR, and the homogeneity analysis technic by area ratio was used to verify the feasibility comparing this result with that from conventional analysis method. The parameter study was performed to evaluate the effect varying ground depth, distance length of reinforcing supports and to verify the field applicability of new analysis method. The results showed the very precise value with allowable error, so this method can be applied in the field, The more length of supporting members caused the more vertical displacement and the top displacement increment of support members is larger than that of ground surace. The effect of ground depth was more impressive than that of distance length of reinforcing supports.

Keywords : Homogenization, discretion, support distance, ground depth, BTR

1. 서 론

경제발전과 산업화에 의한 차량의 증가로 발생한 교통난은 교통사고, 도로혼잡에 의한 생산효율저하, 환경문제 등 시급히 해결해야 할 문제점을 야기하고 있다. 그러므로 이와 같은 문제점들을 효과적으로 개선하기 위해서는 지하공간의 활용과 지하도로의 개발이 필수적이다. 이러한 지하도로의 개발에는 지하터널의 건설이 요구되므로 효율적인 터널의 다양한 시공법이 개발되고 있다. 또한 도시에서 터널의 굴착 시에는 인접구조물의 손상과 붕괴사고, 혹은 공사 중 교통차단에 의한 경제적 손실과 교통 불편 등 심각한 사회문제를 유발시킨다. 따라서 도심지 터널공사 시에는 이러한 문제

를 해결할 수 있는 공법의 개발이 매우 필요하다.

즉, 공사 중 지상의 교통차단이 불필요하고 주변시설물에 영향을 주지 않는 공사방법과 안전관리기법이 요구된다(김학웅, 2007). 본 논문에서는 이러한 목적으로 개발되어 현재 활발히 사용 중에 있는 BTR(Built-in Timbering Roof Type Tunnelling Method)공법에 대하여, 건설단계별 수치해석방법을 개발하고 안전성을 검토하는 방법을 개발하였다(이원희, 2011). BTR공법은 터널굴착 시에 발생할 수 있는 붕괴와 같은 불안정성을 최소화시키기 위해서, 굴착단면 내부의 안정성과 최소굴착면적을 확보하기 위한 파이프루프(Pipe Roof)로 형성된 강관을 삽입한 후, 강지보재를 매립하여 상부 토압을 지지하며 토사를 굴착하여 터널구조물을 완성시키는 친환경적인 비굴착 터널공법이다(Duncan, 1975).

† 교신저자: 방명석, 충북 충주시 대학로 50 충주대학교 안전공학과

M · P: 011-9727-2817, E-mail: msbang@cjnu.ac.kr

2012년 1월 3일 접수; 2012년 3월 7일 수정본 접수; 2012년 3월 16일 게재확정

그러나 이 공법의 적용 시에는 건설단계마다 붕괴의 위험성이 있으므로 단계별 안전성 해석 (Construction Sequence Analysis) 및 검토가 필수적이다(배규진, 2003; 이현범, 2004).

그러나 구조부재와 지반의 상호작용을 수치해석 할 때 정확한 결과를 얻기 위해서는 정밀한 모델링을 해야 하고, 이 경우에 수많은 유한요소수와 해석시간 때문에 시공단계별 해석과 반복적인 안전성검토에 많은 문제점이 발생하고 있다(황선균, 2004). 이에 본 연구에서는 실용적이면서도 정확한 3차원 탄소성 유한해석방법을 개발하여, BTR 공법의 안전성검토를 위한 적용성을 검증하기 위해서 다음과 같은 연구를 수행하였다.

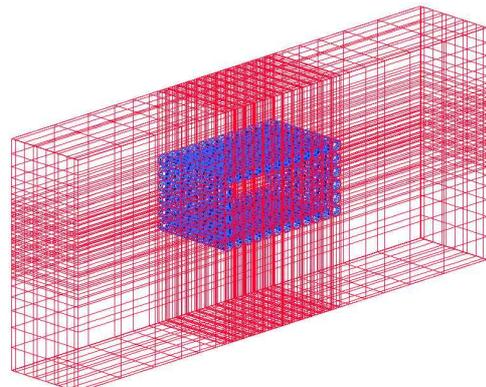
첫째, 기존 방법처럼 지반과 그라우팅 보강지반, BTR공법의 보강부재들을 실제 설계상황에 맞게 개별적으로 모델링하여 이산화해석을 실시하였다. 둘째, 본 연구에서 개발한 면적비로 치환한 균질화기법을 도입한 해석을 수행하고, 이 결과와 기존 이산화방법의 해석결과를 비교함으로써 균질화기법 적용의 타당성을 검증하였다. 셋째, 균질화 해석방법으로 지보공 간격과 토피고를 변화시켜가면서 시공단계별해석을 실시하고 BTR공법의 현장 적용성을 검증하였다. 해석 대상단면은 실제 터널시공이 예상되는 지반에서 지보공 간격 2m, 토피고가 5m인 단면을 선정하였다. 그리고 지보공 간격과 토피고의 변화에 따른 변위 특성과 안전성을 검토하기 위해서 지보공 간격을 2~5m, 토피고를 8~14m로 변화시키면서 변수해석(Parameter Study)을 실시하였다.

2. BTR에서 시공단계별 수치해석

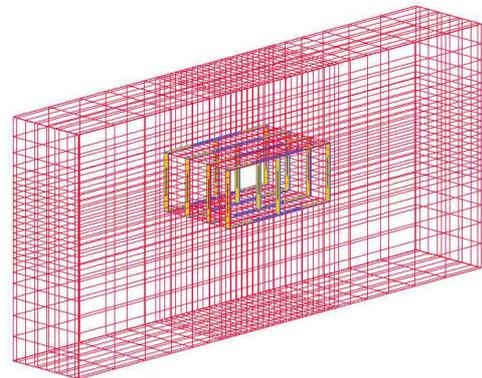
2.1 개요

구조부재요소들과 토질요소가 접촉상태에서 상호 역학적 거동을 하는 터널굴착공법에 대한 수치해석을 하는 경우에 [그림 1], [그림 2]와 같은 두 가지 방법을 적용할 수 있다. 그림 1의 이산화모델방법은 터널주변의 강재와 그라우팅 보강지반, 순수지반을 각각 재료특성에 맞게 구조유한요소와 지반유한요소의 물질계수를 입력하여 해석하는 일반적인 해석방법이다. 이 경우에 강재보는 3차원보요소(beam element), 그라우팅지반과 순수지반은 3차원입체요소(solid element)를 사용하고, 두 요소의 공유절점에서는 자유도해제기법을 이용하여 해석하는 방법이다. 이 방법은 시공단계마다 추가되는 강재 등 부재수가 증가됨에 따라서 모델링요소 수가 기하급수적으로 증가하여 굴착 후반부의 시공단계별

해석과 검토 시 실용적이지 않고, 강재와 토질의 강성 차이가 크므로 요소 간 하중전달이 불가능하여 해석 시 특이성(singularity) 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서 적용한 방법이 그림 2와 같은 균질화 모델링방법이다(김정수, 2006; 김세호, 2007). 이 방법은 이질적인 강재와 보강지반, 순수지반을 등가의 균질화 유한요소로 치환하고 동일한 3차원 입체요소(solid element)를 사용하여 모델링함으로써, 모델링을 단순화하고 해석 시 특이성 문제를 해결하며 해석시간과 비용을 획기적으로 줄일 수 있는 방법이다. 이 경우에 강재와 지반을 등가의 균질요소로 치환하는 방법은 많은 연구가 이루어졌다(1,2,3). 그 중에 가장 일반적으로 받아들여지고 검증된 이론이 평면에서의 면적비와 입체에서의 체적비에 탄성계수를 고려하여 치환하는 방법이다. 이 방법은 단계적 굴착구간에서 구성부재의 응력보다는 굴착상부 도로면 침하관리와 주변구조물의 변위나 기울어짐 관리가 더 중요한 요점이기 때문에 적용성이 높다. 그러나 과거의 연구들은 특정굴착단면에 대한 안전성 검토가 대부분이나, 본 연구에서는 굴착이 진행되는 과정에 따른 시공 단계별 해석을 실시하여 굴착과정의 거동변화 추이를 검토하는 것이 연구의 목적이다.



[그림 1] 이산화 모델링방법



[그림 2] 균질화 모델링방법

본 해석 시에는 탄소성 해석개념을 도입하여 지반요소는 20절점 혹은 8절점 직육면체 요소와 15 절점 및 6절점 프리즘 요소, 4절점 삼각뿔 요소를 적절히 결합해 사용하였으며, 구조요소로 4절점 및 3절점 쉘 요소, 2절점 트러스 요소, 2절점 스프링 요소를 이용하였다. 또한 Mohr-Coulomb 항복기준에 의거하여 탄성-완전소성 재료 모델을 사용하였으며, 접선강도법과 소성상태에서의 증분변형에 대한 유도식은 직교조건 및 상관흐름법칙을 적용하였다. 소성변형과 응력과의 관계는 변형증분이론을 근거로 하였으며 각 응력 경로에 따른 응력-변형관계식을 적용하였다. <표 1>과 <표 2>는 해석에 적용된 재료요소의 특성이다. 해석방법의 정확한 비교를 위해 지보공 간격은 2m에 4개만 단계적으로 설치하고, 토피고는 전 길이가 5m로 가정하여 수치해석을 실시하였다.

<표 1> 해석에 적용된 지반요소

| Parameters | Unit weight (tf/m ³) | Cohesion (tf/m ²) | Friction angle (°) | Elastic modulus (tf/m ²) |
|---------------|----------------------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------------------------|
| Soil | 1.9 | 1.5 | 35 | 7000 |
| Grouting Area | 2.0 | 15 | 35 | 70000 |

<표 2> 해석에 적용된 강제 요소

| Parameters | Elastic modulus | Poisson's ratio | Unit weight |
|------------|-------------------------|-----------------|-----------------------|
| Angle | 2.1×22tf/m ² | 0.3 | 7.85tf/m ³ |
| Steel Pipe | 1.5×21tf/m ² | 0.3 | 2.35tf/m ³ |

해석 목표는 터널 상부에 공용중인 도로 및 철도의 사용성과 안정성 평가의 기준으로 연직 처짐을 적용하기 위해서 변위중심으로 수행하였다. 특히 연직 변위 중 강관 구조물의 천단부 변위(이하 구조물 천단변위)와 도로나 철도 지표면 지반변위(이하 지반변위) 값 중 최대값을 기준으로 값을 산출하였다.

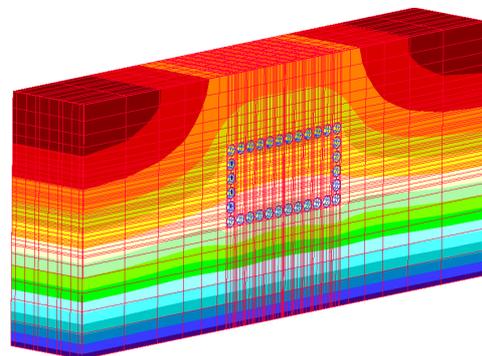
시공단계는 <표 3>에서와 같이 2m의 지보공간격과 5m의 토피고에 따라 동일한 단계로 구분하여 적용하였다. 단계별 굴착은 지보공 설치위치보다 1m 정도 전진 굴착하도록 하였고, 지보공 설치 단계별 굴착이 완료된 후 설치되는 것으로 단계를 구분하였다. 단계별 안전성을 평가하기 위해 표 3에 보여 지는 것과 같이 시공단계를 적용하였다.

<표 3> 시공단계별 해석조건

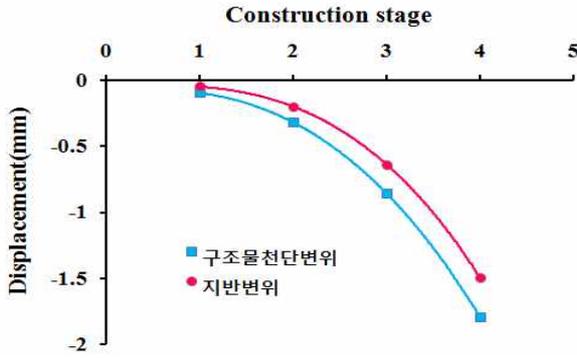
| Stage | Construction |
|----------|--------------|
| Stage 1 | 초기상태 |
| Stage 2 | 굴착 1단계 |
| Stage 3 | 강관 절취 |
| Stage 4 | 1단계 지보공 설치 |
| Stage 5 | 굴착 2단계 |
| Stage 6 | 강관 절취 |
| Stage 7 | 2단계 지보공 설치 |
| Stage 8 | 굴착 3단계 |
| Stage 9 | 강관 절취 |
| Stage 10 | 3단계 지보공 설치 |
| Stage 11 | 굴착 4단계 |
| Stage 12 | 강관 절취 |
| Stage 13 | 4단계 지보공 설치 |

2.1 이산화 수치해석

[그림 3]은 굴착부 시점의 수직변위도를 보여주며 [그림 4]에서 보는 바와 같이 최상부 지반부의 연직 변위는 시공단계가 진행될수록 0.05~1.5mm 증가되었다. 전체적인 변위량은 시공단계별로 일정하게 증가하는 것을 알 수 있으며, 최종 굴착단계에서 가장 큰 변위가 발생하는 것으로 나타났다. 구조물천단변위는 0.1~1.8mm 발생했으며 그 변위경향은 지반변위와 유사한 형태를 나타냈다. 지반변위가 구조물 천단변위보다 20%정도 작은 값을 갖는데 이는 굴착면에 인접해 있는 구조물 천단부가 상부 지반부보다 굴착의 영향을 직접적으로 더 많이 받기 때문인 것으로 판단되었다.



[그림 3] 초기조건에 의한 해석 결과



[그림 4] 굴착단계별 변위량 변화

2.2 균질화 수치해석

2.2.1 해석 개요

본 연구에서 다루고 있는 BTR공법은 터널의 굴착이 단계적으로 진행된다. 따라서 균질화 해석을 위해서는 전체 구조체의 응력 평형상태를 유지하기 위해서, 탄소성 균질화 모델의 총 응력 값이 아닌 응력의 증분 값을 대상으로 유도되어야 한다. 이를 통해 기존 지반에 발생된 응력 값에 영향을 받지 않고 전체 응력장의 평형을 안정적으로 유지하며 수렴하는 비선형 해석을 수행할 수 있다. 이때 터널이 굴착단계별로 수행됨에 따라 기존에 지반이 강관 및 그라우팅재에 의해 보강될 때 기존 지반에 이미 발생되어 있는 응력은 적절히 균질화 보강지반의 구성요소들로 할당되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 식 1과 같이 기존 지반의 응력을 보강지반체를 이루는 하나의 구성요소인 지반 매질 요소에 15% 할당하고 나머지 강관 및 그라우트재 구성요소내의 타설 초기응력은 존재하지 않는 것으로 하였다.

$$\begin{aligned}
 \sigma_h &= \sigma_{ground} \\
 \sigma_{ground\ constituent} &= \sigma_{ground} \\
 \sigma_{pipe\ constituent} &= 0 \\
 \sigma_{grout\ constituent} &= 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

이는 ‘탄성 혹은 탄소성 변형 완료 후, 응력평형상태에 도달한 터널에서는 추가 굴착이 이루어지지 않는 한 추가 응력의 발생 및 재분배는 이루어 지지 않는다’라는 점에 착안된 방안이다. 이러한 방안을 통해 단계적으로 보강을 수행하면서 국부적으로 매질 특성이 바뀌면서도 해석영역의 전체영역장의 평형은 항상 유지될 수 있다.

보강영역 물성치는 아래와 같은 순서로 정해진다.

$$E_{mean} = \frac{E_s A_s + E_m A_m + E_G A_G}{A_s + A_m + A_G} \tag{2}$$

강관의 등가변수는 다음과 같다.

$$A_s = \frac{\pi}{4} [D^2 - (D - 2t)^2] \tag{3}$$

$$E_s = 1.5 \times 10^6 t / m^2$$

여기서, D는 강관의 직경이고 t는 두께이다. 지반의 등가변수는 다음과 같다.

$$A_G = B \times L - (a \times b) \tag{4}$$

$$E_G = 7000t / m^2$$

여기서, B는 전체 폭, L은 전체 길이, a와 b는 내부 폭과 길이이다.

그라우팅영역의 등가변수는 다음과 같다.

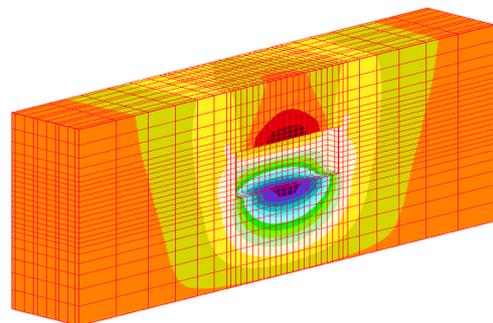
$$A_m = (a \times b) - [(c \times d) + \frac{\pi}{4} (D^2 - (D - 2t)^2)] \tag{5}$$

$$E_m = 70000t / m^2, E_{mean} = 133570t / m^2$$

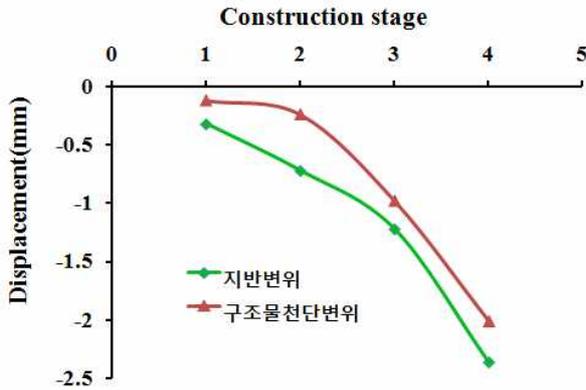
여기서, c와 d는 굴착부분의 폭과 길이이고 그라우팅지반의 탄성계수는 E_G 보다 약 19배이다.

2.2.2 해석 결과

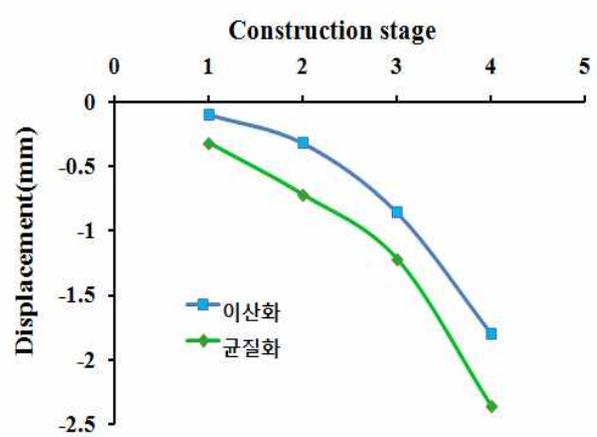
[그림 5]는 굴착부 시점의 수직변위도를 보여주며 [그림 6]은 균질화 시킨 지반의 변위를 시공단계를 변화하여 나타낸 것이다. 지반변위의 경우 0.12~2.01mm 변위가 발생하였고 구조물천단변위의 경우 0.32~2.36mm의 변위가 발생하였다. 두 경우 모두 변위양상이 유사한 것으로 나타났다. 굴착 1단계에서 굴착 후 지보공 설치까지의 연직변화는 거의 변화가 발생하지 않았고 변위량도 매우 적게 나타났다.



[그림 5] 초기단계의 해석결과



[그림 6] 굴착단계별 변위추이



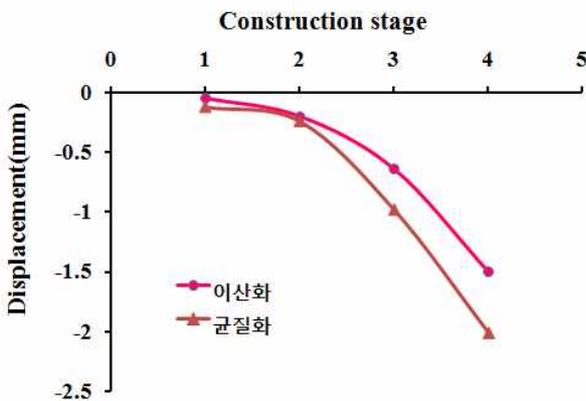
[그림 8] 구조물천단변위 비교

굴착 2단계에서는 굴착 1단계에서와 같이 거의 변화가 발생하지 않았다. 그러나 1단계 굴착단계에 비해 연직변위량이 증가하였다. 굴착 3단계와 굴착 4단계의 경우도 앞의 경우와 마찬가지로 굴착에 따른 변위량 증가는 지속적으로 발생하는 것으로 나타났다.

또한 지반변위에 비해 구조물천단변위가 최대값을 기준으로 17% 정도 큰 변위 값을 갖는 것을 알 수 있었다. 이 경우 역시 앞의 이산화 해석과 마찬가지로 구조물에 인접하여 굴착의 영향을 더 많이 받기 때문인 것으로 판단되었다.

2.3 이산화와 균질화 결과 비교

[그림 7], [그림 8]은 이산화방법에 의한 변위량과 균질화방법에 의한 변위를 지반변위와 구조물천단변위로 나누어 나타낸 것이다. 변위 값은 약간 차이가 있으나 전체적인 변화 양상은 유사하다. 따라서 면적비를 이용한 균질화 해석방법은 해석상 문제가 많은 이산화 해석방법 대신에 적용해도 정확성이나 경제성 측면에서 문제가 없을 것으로 판단되었다.



[그림 7] 지반변위 비교

3. 시공조건별 변수해석

3.1 해석개요

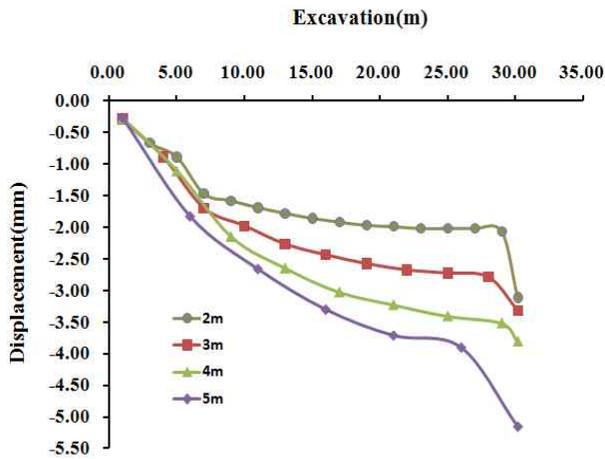
전 절에서는 이산화해석방법과 균질화해석방법의 실용성을 비교하기 위해서, 면적비를 이용하여 각각의 해석을 실시하고 면적비를 이용한 균질화 해석방법의 적용성을 검증하였다. 그러나 앞의 증명과정에서는 정확한 비교를 위해 지보공을 4개 설치하였을 경우와 지보공 간격도 2m에 대해서만 수치해석을 실시하였다. 그러나 실제 구조물은 터널 연장이 보통 30m이고 시공 시 지보공의 수도 수 십개가 되는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 지보공 간격을 2m로 고정하지 않고 지보공 간격을 3m, 4m, 5m로 바꾸어 가면서 그 영향성을 평가하였으며 최적의 간격을 고찰하였다. 그리고 토피고도 연장이 길어지면 변화가 심하므로 현장의 다양한 조건을 고려하여 8m, 11m, 14m로 변화시켜 가면서 변위의 변화추이를 분석하였다. 시공단계는 표 3에서와 같은 방법으로 지보공간격과 토피고를 변화시키면서 동일한 방법으로 적용하였다.

3.2 지보공 간격에 따른 해석 결과

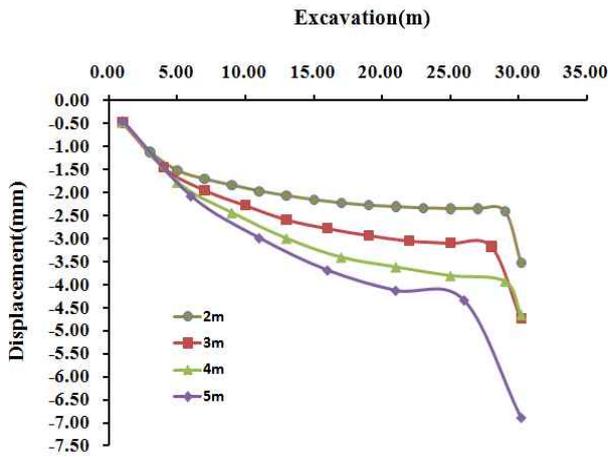
본 절에서는 지보공 간격에 따른 침하량 양상을 파악하기 위해 2~5m 간격으로 지보공을 설치하여 해석을 실시하였으며, 지보공 간격을 변화시킬 경우에 지표면 변위와 터널 천단부의 해석결과는 [그림 9]와 [그림 10]과 같다. 구조물의 천단변위가 지표면 변위보다 일반적으로 큰데 이는 굴착에 따른 지반의 이완을 나타낸다. 그러나 천단변위나 지반변위의 추세는 비슷하고 최종 터널굴착관통 시에 변위가 급격히 증가함을 알

수 있다. 이는 관통 시에 급격한 지반붕괴를 방지하기 위하여 보강이 필요함을 알 수 있다.

지보공 간격이 2~3m일 때는 굴착초기(10m)에 급격한 변위증가량을 보이거나 이후에는 변위 증가량이 미미하다. 그러나 지보간격을 4~5m로 넓혀 가면서 변위증가량이 지속됨을 볼 수 있다. 이는 지보간격이 일정 이상이면 변위가 계속 증가되어 한계치를 넘어갈 수 있으므로 지보공을 일정간격이상으로 설치하는 것은 안전에 문제가 있음을 알 수 있다.



[그림 9] 지반변위 비교



[그림 10] 구조물천단변위 비교

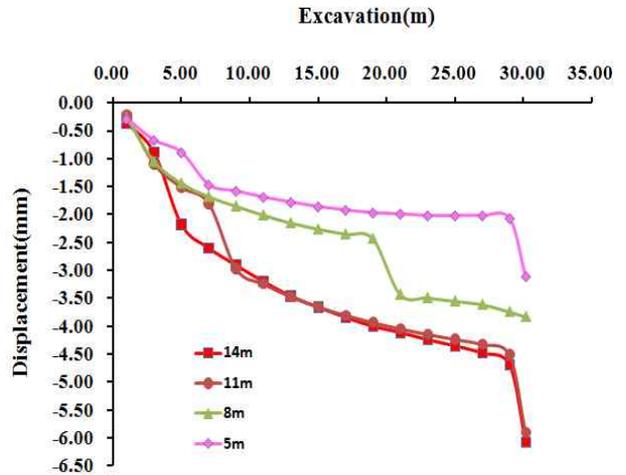
3.3 토피고에 따른 해석 결과

토피고 변화에 따른 구조물의 안정성을 수치해석을 통해 검토하였다. 2절의 해석방법 비교에 적용된 구조물의 토피고는 5m이며, 이를 기준으로 3m씩 토피고를 증가시켜 8m, 11m, 14m일 때의 연직침하량을 지반변위와 구조물천단변위로 구분하여 해석을 실시하였고 그 결과는 [그림 11, 12]와 같다. 여기서 구조물의 지보

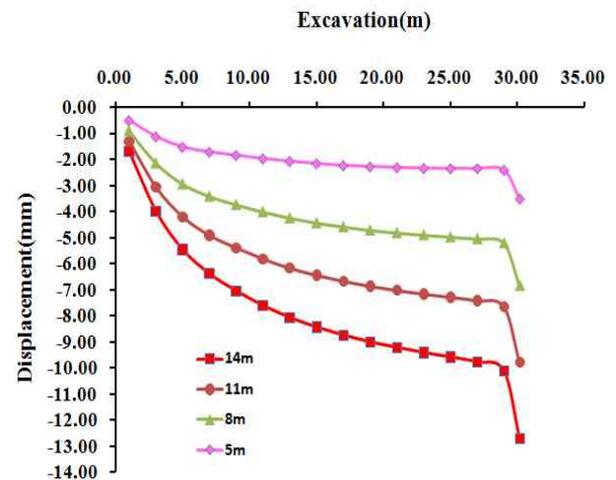
공 간격은 기본조건인 2m로 정하고 해석을 실시하였다.

토피고가 증가됨에 따라서 가장 큰 특징은 지표변위보다 터널천단변위의 증가가 크고, 지표변위는 토피고가 일정한 값 이상이 되면 변화가 없다는 것이다. 이는 천단변위는 토피고 증가만큼 상재하중이 커지므로 비례하여 증가하나, 지표변위는 가해지는 응력만큼 변위에는 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. [그림 11]에서 지반변위곡선이 굴착이 진행됨에 따라서 불규칙선형을 보이는 것은 토피고를 통해서 상재하중이 전해지는 과정에서 응력의 불규칙한 분배에 따른 것이다.

해석결과의 특징은 지보공의 증가에 따른 변위량 증가보다 토피고 증가에 따른 변위량 증가가 크게 나타났다. 특히 지반변위보다는 상대적으로 구조물 천단변위 값이 더 크게 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 토피고 증가에 따른 상재하중의 증가에 의한 영향으로 판단되었다. 따라서 토피고가 커질수록 지표면의 침하보다는 지보재의 안전성 확보가 중요함을 알 수 있었다.



[그림 11] 지반변위 비교



[그림 12] 구조물천단변위 비교

4. 결 론

본 연구에서는 기존 도로 및 철도 지반 하부에 BTR 공법을 적용하여 통로용 터널을 굴착할 때, 구조물과 지반의 안정성 검증을 위하여 현장 상황을 그대로 모사한 이산화 해석과 면적비에 의한 균질화 해석을 실시하여 균질화 해석의 적정성 여부를 판단한 후, 균질화 해석을 기준으로 지보공 간격과 토피고를 변화시키면서 시공단계별 전체 해석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 지반과 강관 및 그라우팅 요소를 독립적인 요소로 보고 수치해석을 실시한 이산화 해석방법과, 구성요소를 면적비와 탄성계수를 이용하여 치환하는 균질화 해석방법의 결과를 비교한 결과 실무적으로 수용할 수 있을 정도로 정확한 해석결과가 나오는 것을 알 수 있었다. 따라서 균질화 해석방법을 적용해도 문제가 없는 것으로 판단된다.

2) 이산화 해석과 균질화 해석 모두에서 초기 굴착단계에 비해 굴착단계가 진행됨에 따라 구조물 천단변위와 지반변위 변위량이 크게 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 굴착 전면에 위치하는 원지반의 저항력 변화에 의한 것으로 판단되었다. 또한 구조물 천단변위가 지반변위에 비해 큰 변위량을 나타냈으며 이는 굴착면에 인접한 구조물 천단부가 더 많은 굴착 영향을 받기 때문인 것으로 사료되었다.

3) 구조물 천단부에서 굴착 2단계일 때 연직변위량이 크게 증가하는데, 이는 강관의 강성을 동일한 탄성계수로 적용하였기 때문에 이와 같은 양상이 발생된 것으로 판단되었다.

4) 지보공 간격이 증가할수록 연직변위량이 커지는 것을 알 수 있었고, 지반변위보다는 구조물천단변위량이 더 많은 증가 값을 갖는 것을 알 수 있었다.

5) 토피고의 증가에 따라 연직변위량은 급격히 증가하였으며, 지보공 간격 변화와 비교하였을 때 변위량이

훨씬 크게 나오는 것을 알 수 있었다. 그러나 토피고가 일정 높이 이상이 되면 변위량이 증가폭이 감소하는데, 이는 토사 두께에 의한 하중 전달 감소에 의한 것으로 사료되었다.

6) 본 연구의 결과 균질화 해석방법을 이용한 시공단계별 해석은 굴착과정에서 안전성을 평가하는데 매우 실용적인 해석도구임이 입증되었다. 또한 이 방법으로 시공단계별 해석을 실시한 결과는 BTR공법의 시공 중 변위가 관리기준값보다 매우 작아 안전성에 문제가 없음을 알 수 있다.

5. 참 고 문 헌

- [1] 김학웅, 정수일, "시설물 안전진단의 문제점과 개선방안에 관한 연구," 대한안전경영과학회지, 제9권, 4호, pp 1-9, 2007
- [2] 이원희, 정광모, 이상현, 방명석, "BTR공법의 안정에 관한 연구," 대한안전경영과학회 추계학술발표회, 2011
- [3] Duncan, J.M. Behaviour and Design of Metal Culvert Structures, ASCE Journal of Geotechnical Division. 20(GT3), pp. 314-417, 1979
- [4] 배규진, 신휴성, 최용기, "터널 보강용 강관 다단 그라우팅 공법의 이방성 복아 메카니즘 규명에 관한 연구" 한국지반공학회논문집, 2003
- [5] 이현범, "터널 굴진에 의한 3차원 지반거동의 2차원적 해석방법", 부경대학교 대학원, 2004
- [6] 황선균, "터널 보조공법(강관 다단) 수치해석과 현장계측의 비교연구," 부경대학교 대학원, 2004
- [7] 김정수, "RPUM 강관의 최적 설계에 관한 연구," 서울산업대학교 대학원, 2006
- [8] 김세호, "터널 강관 다단 그라우팅 공법의 합리적인 수치해석을 위한 균질화 기법의 적용성 연구," 한양대학교 대학원, 2007

저 자 소 개

정 광 모



성균관대학교 토목공학과에서 석사학위를 취득하고 현재 한국교통대학교 안전공학과 박사과정에 재학 및 한국종합기술에서 상무로 근무 중임. 연구관심분야는 사회기반시설의 안전성설계임.

주소: 서울시 광진구 구의동 546-1

이 상 현



충남대학교 토목공학과에서 박사학위를 취득하고 현재 성원기술개발(주) 기술연구소 소장으로 근무중 임. 연구관심분야는 사회기반시설의 안전성설계와 각종 슬러지의 재처리 및 자원화, 굴착기술임

주소: 서울시 금천구 가산동 680

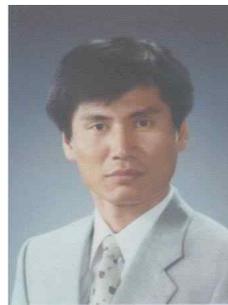
이 원 희



현재 한국교통대학교 안전공학과 석사과정에 재학 중이며 삼보굴착(주)에서 굴착기술을 개발 및 시공하고 있음. 연구 관심분야는 무개착 굴착기술 및 장비개발, 굴착 중 안전기술임.

주소: 서울시 강남구 삼성동 113-1

방 명 석



KAIST 토목공학과에서 박사학위를 취득하고 현재 한국교통대학교 안전공학과 교수로 재직중 임. 연구관심분야는 건설공사 중 안전문제, 시설물의 안전성 분석 임.

주소: 충북 충주시 대학로 50