한국지반공학회논문집 제19권 6호 2003년 12월 pp. 245 ~ 259

터널 보강용 강관 다단 그라우팅 공법의 이방성 보강 메카니즘 규명에 관한 연구

A Study on Anisotropic Reinforcing Mechanism of Umbrella Arch Reinforcement Method in Tunnelling

배 규 진*1 Bae, Kyu-Jin
신 휴 성*2 Shin, Hyu-Sung
최 용 기*3 Choi, Yong-Ki

Abstract

This paper deals with an Umbrealla Arch Reinforcement Method (UARM) in tunnelling. It is known that the mechanism of the reinforcement system is too complex to be simulated in existent finite element (FE) frameworks when considering its complex geometry of pipe arrangements and contribution of each component of the reinforcement to reinforcing effect. In this study a 3-D elastoplastic FE procedure is, therefore, proposed by introducing homogenisation technique, which is used to define mathematically elastic as well as elastoplastic characteristics of a reinforced ground material as a composite. A number of practical suggestions are addressed considering staged constructions of tunnels. For illustrative purposes, a series of parametric studies are undertaken and anisotropic characteristics of the reinforced ground as well as effects of the reinforcement on tunnel convergences are investigated. It is found that the reinforced ground material defined in homogenisation framework has its mechanical characteristics reasonably representing inherent geometrical and quantitative characteristics of each of constituents.

요 지

본 논문은 강관 다단 그라우팅 터널 보강에 대한 메카니즘 규명에 대한 연구이다. 본 보강공법을 구성하고 있는 보강요소들의 복잡한 기하학적 특성과 각 보강요소들이 전체 보강 메카니즘에 기여하는 정도의 불명확성에 기인하여 본 공법으로 보강된 터널을 합리적으로 해석하기란 무척 어려운 문제로 여겨지고 있다. 따라서 본 연구에서는 균질화 기법을 도입하여 본 공법으로 보강된 지반매질을 하나의 복합체로써 정의하고 수치 모델화하여, 이를 기반으로 3차원 탄소성 유한요소코드를 개발하였다. 이때 균질화 기법과 연계된 굴착단계별 해석 등과 같은 터널해석을 위해 요구되는 다양한 실용적인 알고리즘들 또한 제안되었다. 이러한 과정으로 개발된 3차원 탄소성 유한요소코드를 이용하여 본 보강공법의 이방성 보강 메카니즘에 관하여 고찰되었으며, 이를 위해 다양한 주요 설계인자들에 대한 매개변수 연구가 수행되었다. 이를 통해 유도된 복합 보강 지반체의 역학적 거동특성은 각 구성 매질들의 기하학적 특성과 기여도 등을 잘 모사하고 있는 것으로 판단되었다.

Keywords : Homogenization technique, Three-dimensional elastoplastic finite element analysis, Tunnel reinforcements, Umbrella arch reinforcement method

*1 정회원, 한국건설기술연구원, 지반연구부, 부장/연구위원 (Member, The Head of Geotechnical Engrg., Research Dept., KICT)
*2 정회원, 한국건설기술연구원, 지반연구부, 선임연구원 (Member, Senior Researcher, KICT, hyushin@kict.re.kr)
*3 정회원, 대원토질(주), 대표이사 (Member, The President of Daewon Soil Ltd.)

1. 서 론

굴착 전, 지반의 선보강과 지하수의 차수를 목적으로 적용되는 강관 다단 그라우팅 보강 공법은 취약한 지반에 터널을 굴착할 때 일반적으로 적용되어온 대표적인 터널 보조 보강공법이다. 본 공법은 터널굴착 전, 터널 주변 전방 지반에 터널굴착방향으로 일렬의 강관을 평행하게 또는 일정각도를 가지게 타설하여, 타설된 강관을 통해 그라우팅을 수행함으로써 각 강관들을 연결시키고 터널주변 지반을 선 강화하는 공법이다. 그러나 본 공법에서는 다양한 보강재들이 각기 다른 매질특성을 가지고 임의의 타설방향으로 타설되고, 각 보강재들의 보강 메커니즘들이 서로 다르고, 복합된 보강 메카니즘은 상당히 복잡하기 때문에, 본 보강공법이 적용된 터널의 거동을 적절히 예측하기란 상당히 어려운 일이다. 따라서 본 공법의 설계인자들은 적절한 구조해석을 통한 공학적이고 객관적인 방법으로 결정되지 못하고 관련 기술자들의 경험 및 직관에 의존해 오고 있는 실정이다.

이러한 배경으로 지난 수년간 많은 연구자들에 의해 다양한 터널 보조 보강공법들을 객관적이고 보다 공학적으로 모델링하기 위한 노력들이 경주되어 왔다. 이때 각 보강요소들을 개별적으로 모델링하는 미시적 접근방식(micro-scale approach)이 보편적으로 적용되어 왔다. Kotake 등(1994) 은 고압 그라우팅을 이용하여 터널 막장 상단에 콘크리트 지붕을 형성하게 되는 경우에 대해 쉘(shell)요소를 적용하여 그라우트 다단 공법의 구조해석을 수행하였다. 한편 국내에서는 이봉열 등(1996)이 3차원 영역에서 강관을 보요소(beam element)로 모사하고 터널 천단 침하량을 기준으로 약 20%의 보강효과를 검증하였다. 또한 김창용 등(1998)도 강관을 보요소로 모사하였지만 보요소의 매질물성을 강관과 주입된 그라우트재의 부피비를 이용한 평균값으로 적용하였다. 김무일(1995)은 강관을 보요소로, 주변 그라우팅 지반에 대해서는 압축력을 받는 쉘요소를 사용하여 3차원 유한요소 해석을 실시한 바 있다. 또한 이준석 등(2000)은 가상 직사각형 터널과 실제터널에 대해 보요소로 구현된 강관 보강효과의 해석 결과를 제시한 바 있다. 이상의 미시적 접근방식은 각각의 보강요소를 모델링하기 위해 선정된 유한요소의 종류와 유한 요소망의 형태가 해석결과에 상당히 민감하게 작용하는 것으로 나타나고 있다(이준석 등, 2000).

한편으로 이러한 미시적 접근방식에 반하여, 사전에 지반 및 각 보강요소들의 역학적, 기하학적인 특성들을 고려함으로써 하나의 독립된 보강지반 매질모델을 수학적으로 정의하고, 이를 이용해 보강된 터널의 구조해석을 수행하는 거시적 접근방식(macro-scale approach)이 시도되어 왔다. 본 접근방식은 개략적으로 보강영역을 설정하고, 그 영역을 유도된 이방성 복합체 매질로 정의함으로써 보다 쉽게 보강효과를 해석하는 방안이다. 이때 유도된 이방성 복합매질은 명확한 이론적 근거 하에, 쉽게 알 수 있는 각 구성요소들의 역학적 물성들과 기하학적 특성들에 의해 정의된다. 본 접근 방식을 따르며 지반 보강재료들의 보강효과를 고찰한 연구로는 Multi-laminate 모델(Zienkiewicz and Pande, 1977)을 이용하여 다양한 보강지반에 대한 수학적 복합 매질모델을 유도한 연구사례들을 들 수 있다(Gerrard and Pande, 1985; Schweiger and Pande, 1986). 또한 Bernaud et al.(1995)는 균질화 기법(homogenisation technique)을 이용하여 록볼트로 보강된 지반의 수학적 매질모델을 유도하고 터널의 거동해석을 수행하였다.

국내에서는 그라우팅에 의한 터널 보강효과를 변형율 에너지 이론을 도입해 보강지반을 이방성 탄성복합체로 가정하고 매질 물성을 유도한 사례(이종우 등, 1996)를 시발점으로 하여 보강지반의 거시적 해석방법이 활성해지기 시작하였다. 이어 유도된 이방성 탄성 매질모델이 이준석 등(1997)에 의해 탄소성 매질 모델로 확장 되었다. 방춘석 등(2001)은 같은 모형(수직 그라우팅+터널 막장 수평 강관 타설)을 대상으로 균질화 기법을 적용, 복합 이방성 탄성 매질모델을 유도하였으며, 이를 모형실험 결과와의 비교를 통해 검증하였다. 최근에 이준석 등(2000)은 본 연구에서 다루고 있는 강관 다단 그라우팅으로 보강된 지반의 이방성 탄성 매질모델을 유도하였다. 이때 유도된 보강지반체의 매질 특성은 일방향 직교 이방체로써 주변 강관에서 주입되는 그라우트재들은 서로 연결되지 않는 것으로 설정되었다.

이러한 배경으로 본 연구에서는 강관 다단 그라우팅 보강지반을 합리적으로 모델링 하기 위하여 우선적으로 지반 및 각 보강 요소들(강관 및 그라우트재)을 적절히 배열하여 보강지반을 하나의 복합체로써 모형화 하였다. 이때 이준석 등(2000)에서 설정된 모형과는 달리 각 강관이 그라우트재로 연결되는 보강구조로 모형화 하고자 한다. 다음, 2단계 균질화 기법(Dual homogenisation technique)을 통하여 모형화된 보강지반체의 이방성 탄소성 매질모델을 유도하고 정의하였다. 이때 유도된 매

질모델의 역학적 특성은 지반 및 각 보강재의 탄성물성과 지반체적에 대한 보강 요소들의 체적비의 함수로 정의된다. 또한 탄소성 해석과정 동안, 응력 및 변형율 평형조건들을 항시 만족시키기 위하여 새로운 탄소성 해석 알고리즘을 개발하였다. 이렇게 개발된 보강지반의 이방성 탄소성 균질화 모델을 유한요소 코드화 하고, 균질화 기법이 적용된 3차원 유한요소코드 내에서 굴착단계별 해석 등이 가능하도록 전체 응력평형을 만족할 수 있는 원지반과 보강지반간의 응력 할당 방안이 제안되고 구현되었다. 따라서 강관다단 그라우팅 공법의 주요 설계인자들에 대한 다양한 매개변수 연구를 통하여 유도된 이방성 복합 보강 지반모델의 탄소성 거동특성 및 터널 보강효과를 고찰하여 보았다.

2. 강관다단 그라우팅 보강지반체의 이방성 수치 모델의 유도

2.1 강관다단 그라우팅 보강지반의 모형화

그림 1에서 X-Y-Z축은 구조체를 정의하기위한 전체 좌표계를 의미하며 Z축이 터널 축선 방향을 나타낸다. 이러한 전체 좌표계와는 독립적으로 각 이방성 매질은 그 매질의 이방성 특성에 따라 자체의 국부좌표계(x-y-z), 즉 각 이방성 매질축(material axis)을 갖는다.

그림 1은 본 연구에서 이상화 되어 설정된 강관 다단 그라우팅 보강지반 모형을 보여준다. 여기서, 강관의 경우, 횡방향으로 일정간격을 두고 독립적으로 타설되므로 터널 횡단면과 평행한 방향으로 작용하는 압축 및 인장력에 대한 강관의 보강효과를 기대하기는 어렵게 된다. 그러나 각 강관에서 주입되는 그라우트재의 경우는 강관과 지반과의 접착과 강관주변 지반의 보강을 목적으로 하고 있지만, 현재 국내의 강관 다단 그라우팅

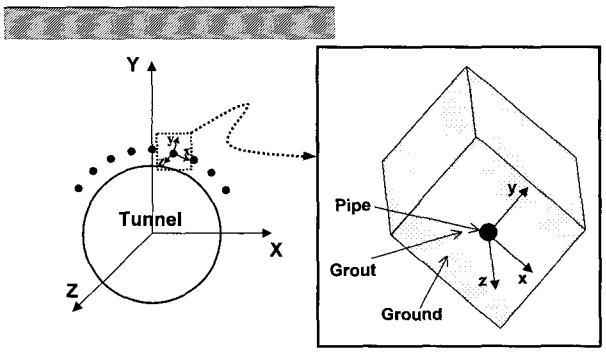


그림 1. 강관 다단 그라우팅 보강지반의 모형화

공법은 이러한 목적뿐 만 아니라, 강관과 강관사이를 연결하여 터널 단면을 폐합시켜 보다 큰 아취 효과를 기대할 수 있도록 시공되기 때문에 인접 강관에서 주입되는 그라우트재와는 서로 연결된다고 가정하는 것이 보다 합리적이라 판단된다.

이로 인해 그라우트재로 보강된 형태는 아취형의 천정구조를 이루게 됨에 따라 터널 반경 방향(radial direction)으로의 하중에 대해 그라우팅 보강재의 보강효과가 기대되며, 이는 모델링 시 필히 고려되어야 할 것으로 판단된다.

2.2 강관다단 그라우팅 보강지반체의 유도

그림 1에서 같이 3개의 보강요소들로 구성된 복합체의 역학적 상관관계를 매질축을 기준으로 정의하기 위하여 2단계의 균질화 과정(dual homogenisation procedure)을 도입한다. 먼저 지반(1)과 강관(2)으로 구성된 복합체(I)를 1단계 균질화 과정을 통해 정의하고 2단계 균질화 과정을 통해 1단계에서 정의된 복합체(I)와 그라우트재(3)로 이루어진 최종 보강지반체(eq)를 정의 한다.

2.2.1 제1단계 균질화 과정(지반(1)+강관(2))

우선적으로 Hill(1963)의 기본이론을 적용하면 복합체(I)의 평균 응력 및 변형율은 다음과 같다.

$$\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{I} = \eta^{(1)}\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{(1)} + \eta^{(2)}\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{(2)} \tag{1}$$

$$\Delta\boldsymbol{\sigma}^{I} = \eta^{(1)}\Delta\boldsymbol{\sigma}^{(1)} + \eta^{(2)}\Delta\boldsymbol{\sigma}^{(2)} \tag{2}$$

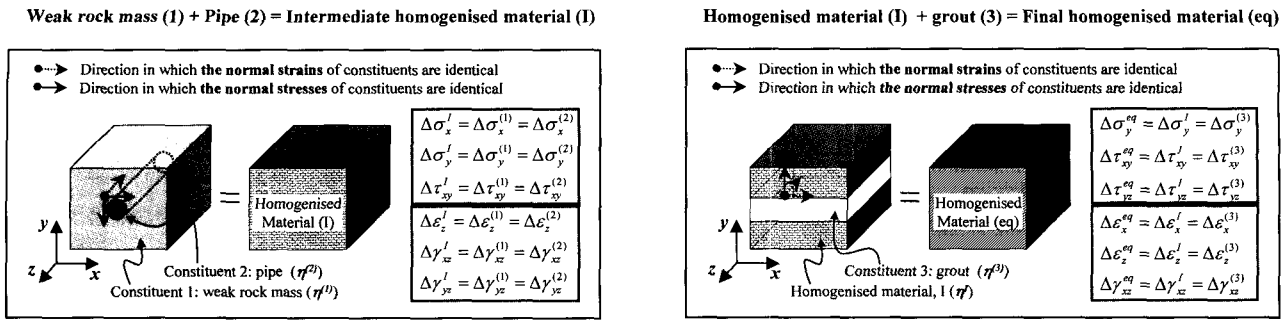
$$\eta^{(1)} + \eta^{(2)} = 1 \tag{3}$$

여기서 η는 매질 (1)과 (2)의 상호간의 체적비이다. 다음, 각 매질들이 서로 완전 접합되어 있다는 가정과 주어진 지반(1)과 강관(2)의 기하학적 특성을 고려하면 각 매질 경계면에서의 응력평형 및 변형율 적합 조건식들을 그림 2(a)에서와 같이 얻을 수 있다. 그림 2(a)에서 설정된 평형 및 적합 조건식들을 행렬형식으로 재 표기하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\delta_1]\Delta\boldsymbol{\sigma}^{I} = [\delta_1]\Delta\boldsymbol{\sigma}^{(1)} = [\delta_1]\Delta\boldsymbol{\sigma}^{(2)} \tag{4}$$

$$[\delta_2]\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{I} = [\delta_2]\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{(1)} = [\delta_2]\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{(2)} \tag{5}$$

여기서



(a) 1단계 (b) 2단계

그림 2. 2단계 균질화 과정의 모식도

$$[\delta_1]=\begin{bmatrix}1&0&0&0&0&0\\0&1&0&0&0&0\\0&0&0&1&0&0\end{bmatrix},$$

$$[\delta_2]=\begin{bmatrix}0&0&1&0&0&0\\0&0&0&0&1&0\\0&0&0&0&0&1\end{bmatrix} \quad (6)$$

따라서 평형 및 적합 조건식 (4)와 (5)에 각 매질의 강성도 행렬 [D]를 이용하여 통합하고, 식 (6)을 이용해 분해하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$[\delta_1]\Delta\boldsymbol{\sigma}^{(i)}=[\delta_1][D^{(i)}]\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{(i)}=[E^{(i)}][\delta_2]\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{(i)}+[F^{(i)}][\delta_1]\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{(i)};\quad i=1,2 \quad (7)$$

여기서 i는 매질의 종류를 나타내며,

$$[E^{(i)}]=\begin{bmatrix}D_{13}^{(i)}&D_{15}^{(i)}&D_{16}^{(i)}\\D_{23}^{(i)}&D_{25}^{(i)}&D_{26}^{(i)}\\D_{43}^{(i)}&D_{45}^{(i)}&D_{46}^{(i)}\end{bmatrix},$$

$$[F^{(i)}]=\begin{bmatrix}D_{11}^{(i)}&D_{12}^{(i)}&D_{14}^{(i)}\\D_{21}^{(i)}&D_{22}^{(i)}&D_{24}^{(i)}\\D_{41}^{(i)}&D_{42}^{(i)}&D_{44}^{(i)}\end{bmatrix};\quad i=1,2 \quad (8)$$

이다. 다음, 위의 식 (7)을 이용하면 식 (4)는 다음과 같이 재구성할 수 있다.

$$[E^{(1)}][\delta_2]\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{(I)}+[F^{(1)}][\delta_1]\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{(1)}=[E^{(2)}][\delta_2]\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{(I)}+[F^{(2)}][\delta_1]\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{(2)} \quad (9)$$

또한, 식 (1)을 상기식 (9)에 적용하면 각 구성 매질들의 변형율과 복합체(I)의 변형율간의 상관관계를 정의하는 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$[\delta_1]\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{(2)}=\frac{1}{\eta^{(2)}}[\delta_1]\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{I}-\frac{\eta^{(1)}}{\eta^{(2)}}[\delta_1]\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{(1)} \quad (10)$$

다음, 식 (10)을 식 (9)에 대입하고 식 (5)을 고려하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$[\delta_1]\boldsymbol{\varepsilon}^{(1)}=[\overline{S}^{(1)}]\boldsymbol{\varepsilon}^{I} \quad (11)$$

여기서

$$[\overline{S}^{(1)}]=\left\{\left([F^{(1)}]+\frac{\eta^{(1)}}{\eta^{(2)}}[F^{(2)}]\right)[\delta_1]\right\}^{-1}\left\{\frac{1}{\eta^{(2)}}[F^{(2)}][\delta_1]+\left([E^{(2)}]-[E^{(1)}]\right)[\delta_2]\right\} \quad (12)$$

따라서, 식 (11)의 행렬형태를 고려하면서 최종 복합체(I)의 변형율과 지반(1)의 변형율의 상관관계를 정의하는 구조 행렬식을 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{(1)}=[S^{(1)}]\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{I} \quad (13)$$

여기서

$$[S^{(1)}]=\begin{bmatrix}\overline{S}_{11}^{(1)}&\overline{S}_{12}^{(1)}&\overline{S}_{13}^{(1)}&\overline{S}_{14}^{(1)}&\overline{S}_{15}^{(1)}&\overline{S}_{16}^{(1)}\\\overline{S}_{21}^{(1)}&\overline{S}_{22}^{(1)}&\overline{S}_{23}^{(1)}&\overline{S}_{24}^{(1)}&\overline{S}_{25}^{(1)}&\overline{S}_{26}^{(1)}\\0&0&1&0&0&0\\\overline{S}_{31}^{(1)}&\overline{S}_{32}^{(1)}&\overline{S}_{33}^{(1)}&\overline{S}_{34}^{(1)}&\overline{S}_{35}^{(1)}&\overline{S}_{36}^{(1)}\\0&0&0&0&1&0\\0&0&0&0&0&1\end{bmatrix}. \quad (14)$$

구조 행렬식 (14)의 각 요소들은 식 (12)로 부터 결정될 수 있으며, 강관(2)과 복합체(I)의 변형율 상관관계는

식 (13)을 식 (1)에 대입함으로써 다음과 같은 지반(1)의 경우와 유사한 형태로 유도될 수 있다.

$$\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{(2)} = [S^{(2)}]\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{I} \tag{15}$$

여기서

$$[S^{(2)}] = \frac{1}{\eta^{(2)}}\left\{[I] - \eta^{(1)}[S^{(1)}]\right\} \tag{16}$$

마지막으로 각 구성 매질들의 구조 행렬식 (13)과 (14)들을 식 (2)에 대입함으로써 지반(1)과 강관(2)으로 구성된 최종 복합체의 평균응력과 평균 변형율간의 상관관계를 정의하는 다음과 같은 식을 결정할 수 있다.

$$\Delta\boldsymbol{\sigma}^{I} = [D^{I}]\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{I} \tag{17}$$

여기서

$$[D^{I}] = \left(\eta^{(1)}[D^{(1)}][S^{(1)}] + \eta^{(2)}[D^{(2)}][S^{(2)}]\right). \tag{18}$$

이는 강관으로 보강된 지반의 복합체(I)의 이방성 강성도 행렬을 의미한다.

2.2.2 제2단계 균질화 과정(지반-강관 복합체(I) + 그라우트재(3))

그림 2(b)에서와 같이 정의된 그라우트재의 기하학적 특성을 고려하여 1단계의 균질화 과정에서와는 다른 응력평형 및 변형율 적합 조건식(그림 2(b) 참조)은 얻을 수 있다. 2단계 균질화 유도과정을 위해 새롭게 유도된 조건식들을 이용하고 1단계에서와 같은 방식의 균질화 과정을 따르면 지반과 강관과의 복합체(I)와 최종 복합체(eq)의 변형율간 상관관계는 다음과 같은 새로운 구조행렬식을 통해 정의된다.

$$\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{I} = [S^{I}]\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{eq} \tag{19}$$

여기서

$$[S^{I}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \overline{S}^{I}_{11} & \overline{S}^{I}_{12} & \overline{S}^{I}_{13} & \overline{S}^{I}_{14} & \overline{S}^{I}_{15} & \overline{S}^{I}_{16} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \overline{S}^{I}_{21} & \overline{S}^{I}_{22} & \overline{S}^{I}_{23} & \overline{S}^{I}_{24} & \overline{S}^{I}_{25} & \overline{S}^{I}_{26} \\ \overline{S}^{I}_{31} & \overline{S}^{I}_{32} & \overline{S}^{I}_{33} & \overline{S}^{I}_{34} & \overline{S}^{I}_{35} & \overline{S}^{I}_{36} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \tag{20}$$

$$[\overline{S}^{I}] = \left\{\left([F^{I}] + \frac{\eta^{I}}{\eta^{(3)}}[F^{(3)}]\right)[\delta_3]\right\}^{-1}\left\{\frac{1}{\eta^{(3)}}[F^{(3)}][\delta_3] + \left([E^{(3)}] - [E^{I}]\right)[\delta_4]\right\}; \tag{21}$$

$$[\delta_3] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$[\delta_4] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{22}$$

$$[E^{(i)}] = \begin{bmatrix} D^{(i)}_{21} & D^{(i)}_{23} & D^{(i)}_{26} \\ D^{(i)}_{41} & D^{(i)}_{43} & D^{(i)}_{46} \\ D^{(i)}_{51} & D^{(i)}_{53} & D^{(i)}_{56} \end{bmatrix};$$

$$[F^{(i)}] = \begin{bmatrix} D^{(i)}_{22} & D^{(i)}_{24} & D^{(i)}_{25} \\ D^{(i)}_{42} & D^{(i)}_{44} & D^{(i)}_{45} \\ D^{(i)}_{52} & D^{(i)}_{54} & D^{(i)}_{55} \end{bmatrix}; \quad i = I, 3 \tag{23}$$

또한 2단계에서 균질화된 그라우트재 (3)과 최종 복합체 (eq)와의 변형율간 상관관계는 다음과 같다.

$$\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{(3)} = [S^{(3)}]\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{eq} \tag{24}$$

여기서

$$[S^{(3)}] = \frac{1}{\eta^{(3)}}\left\{[I] - \eta^{I}[S^{I}]\right\} \tag{25}$$

이며, η는 각 매질 I와 (3)의 상호간 체적비이다. 마지막으로 위에서 유도된 보강지반체를 구성하고 있는 각 매질들의 구조행렬들과 강성도 행렬을 이용하여 유도된 최종 복합체 (eq)의 구성방정식은 다음과 같다.

$$\Delta\boldsymbol{\sigma}^{eq} = [D^{eq}]\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{eq} \tag{26}$$

여기서

$$[D^{eq}] = \left(\eta^{I}[D^{I}][S^{I}] + [D^{(3)}]\left\{[I] - \eta^{I}[S^{I}]\right\}\right). \tag{27}$$

이상과 같은 이방성 보강지반체의 유도는 앞에서 언급한 국부좌표계를 기반으로 유도되며, 본 보강지반체가 터널 주변에 적용될 때에는 적절한 매질의 이방성을 표현하기 위하여 전체좌표계를 기준으로 매질축의 좌

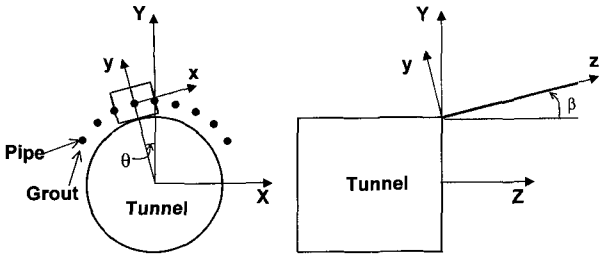


그림 3. 전체 좌표계에 대한 강관 타설각의 정의

표변환을 수행하여야 한다. 이때, 보강영역 내에서도 각 지점마다 강관의 타설방향이 다르므로 매질의 이방성 특성은 다르다. 따라서, 본 연구에서는 그림 3에서와 같이 강관의 타설방향을 정의하기 위하여 각도 θ와 β를 정의하고, 각도 β는 해석의 입력값이며, θ는 각 지점의 적분점의 좌표와 입력치인 터널축의 좌표값으로 내부적으로 자동 계산된다. 이러한 θ와 β값을 이용하여 적분점들 각각에서 일반적인 응력 및 변형율 성분에 대한 좌표변환 행렬 $[T_1]$과 $[T_2]$를 쉽게 정의 할 수 있으며, 본 행렬들을 이용해 다음과 같이 보강영역 내 각 지점의 이방성 매질축 좌표변화을 자유로이 수행할 수 있다.

$$\Delta\sigma^{eq} = [T_1]\Delta\sigma;\ \Delta\varepsilon^{eq} = [T_2]\Delta\varepsilon \qquad (28)$$

$$\Delta\sigma = [T_1]^{-1}[D^{eq}][T_2]\Delta\varepsilon = [\bar{D}^{eq}]\Delta\varepsilon \qquad (29)$$

여기서 Δσ와 Δε는 전체좌표계에서 정의된 보강지반체의 응력 및 변형율 증분 벡터를 의미하며 $[\bar{D}^{eq}]$는 전체좌표계에서 정의된 최종 보강지반체의 이방성 강성도 행렬이다.

3. 균질화 기법에 기반한 탄소성 해석 알고리즘

본 연구에서는 강관 다단 그라우팅 보강지반의 탄소성 거동을 모사하기 위한 알고리즘을 개발 하였다. 이를 위해 보강지반을 구성하고 있는 모든 보강요소들 각각에 독립적으로 일반적인 탄소성 이론을 적용하고(Zienkiewicz and Taylor, 2000), 도입된 균질화 과정을 통해 결정된 각 구성요소들의 탄소성 거동을 복합시키는 개념을 사용한다. 탄소성 해석 과정에서도 전 절에서 유도된 탄성 균질화 과정을 그대로 따른다. 그러나 굴착단계별 해석 방안을 적용할 경우 보강이 수행되기 전에 이미 지반응력이 존재하며, 이후 국부적으로 어느 보강요소 응력이 탄성한계를 넘어 선다면 각 보강지반 구성요소들의 응력값들에 의해 결정되는 균질화 보강지반내의 응력값은 기존 지반체 응력값과 큰 차이를 보이게 된다. 이로 인해 응력장의 평형은 불안정한 상태가 되며, 해석의 수렴에 문제가 발생하게 된다. 이에 대해 각 구성요소의 총 응력 및 변형율을 이용했던 탄성해석의 경우와는 달리 탄소성 해석 과정에서는 응력 및 변형율의 증분에 대해 적용되며 결정된 증분량을 균질화 보강지반과 각 구성요소의 총 응력 및 변형량에 추가시키는 방식을 제안하여 사용한다.

보강 후, 초기의 하중 재하단계에서 각 구성요소들은 탄성한계내에 있으므로 균질화 보강체의 강성도 행렬은 식 (27)에서와 같이 각 구성요소들의 탄성 강성도 행렬에 의해 결정된다. 이때, 계산된 각 구성요소들의 응력값과 균질화 보강지반의 응력값들은 균질화를 위해 설정된 기본 조건식인 평형 및 적합조건식들(그림 2)을 무리없이 만족시킨다. 하지만, 구성요소들 중 탄성한계를 벗어나 응력의 재분배가 이루어 질 경우 각 보강요소 내의 응력 및 보강지반체의 평균응력상태는 더 이상 균질화 과정에서 설정된 평형 조건식들을 만족되지 않는다. 이의 해결을 위해 이준석 등(1997)은 기본 조건식들을 만족시키기 위하여 재분배된 구성요소의 응력값들을 임의로 수정하는 방안을 사용하였다. 그러나 각 구성요소의 응력값을 합리적인 이론적 근거 없이 임의로 변경하는 것은 결과의 신뢰성과 객관성 확보가 어려울 것이다. 따라서 본 연구에서는 구성요소들에 응력 재분배가 발생한다면 적용된 소성이론을 근간으로 계산될 수 있는 탄소성 강성도 행렬을 계산하고 이를 이용해 응력이 소산된 요소매질의 구조행렬을 지속적으로 갱신함으로써 해석 중 반복적으로 수행되는 균질화 계산과정을 재설정하는 방안을 제안한다.

앞에서 언급된 응력 및 변형율의 증분을 근간으로 구성된 탄소성 균질화 과정과 각 구성요소들의 탄소성 강성도 행렬의 반복 적용 방안은 그림 4의 흐름도에 나타내었다.

여기서, 균질화 지반보강 매질의 탄소성 거동은 각 구성요소의 탄소성 거동특성에 의해 지배된다. 각 하중재하 단계마다 일반적인 유한요소 계산과정을 통해 복합지반의 변형율 성분이 계산되면 각 구성매질의 구조행렬과 강성도 행렬을 이용해 구성매질의 변형율 및 응력을 계산할 수 있으며, 각 매질에 적용된 이완함수를 이용해 응력 소산 여부를 결정하고 응력이 탄성한계를 넘었을 시는 소성 변형율의 계산과 소산된 총 응력을 계산한다. 다음 각 매질의 탄소성 강성도 행렬을 재설정

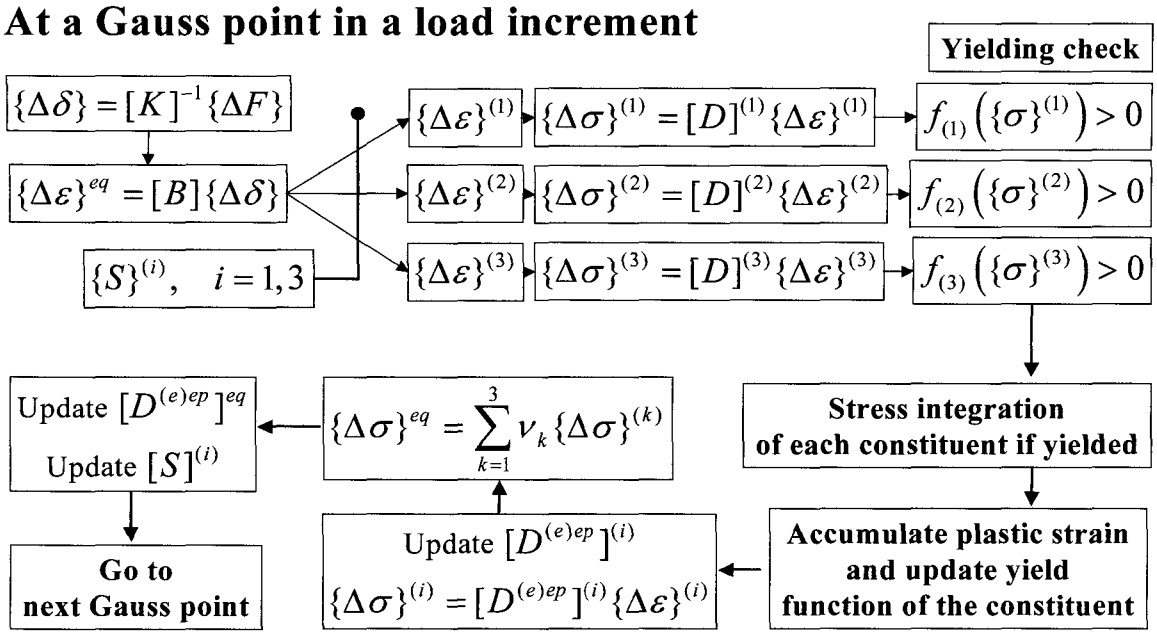


그림 4. 균질화 과정을 통한 탄소성 해석 알고리즘의 흐름도

하고 이를 바탕으로 각 구조행렬을 갱신한다. 이렇게 계산된 각 매질의 응력성분들은 평균장 이론을 이용해 쉽게 보강지반 복합체의 응력성분을 계산하여 일반적인 유한요소 계산과정으로 복귀한다.

4. 균질화 기법에 기반한 굴착단계별 강관 다단 그라우팅 보강 해석

본 연구에서 다루고 있는 강관다단 그라우팅 보강은 터널의 굴착이 단계적으로 진행되면서 타설된다. 이때 전체 구조체의 응력 평형상태를 유지하기 위해 유도된 탄소성 균질화 모델은 총 응력값이 아닌 응력의 증분값을 대상으로 유도되었다. 이를 통해 기존 지반에 발생된 응력값에 영향을 받지 않고 전체 응력장의 평형을 안정적으로 유지하며 수렴하는 비선형 해석을 수행할 수 있다. 이때 터널이 굴착단계별로 수행됨에 따라 기존에 지반이 강관 다단 그라우팅으로 보강될 때 기존 지반에 이미 발생되어 있는 응력은 적절히 균질화 보강지반의 구성요소들로 할당되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 식 (30)과 같이 기존 지반의 응력을 보강지반체를 이루는 하나의 구성요소인 지반 매질요소에 100%할당하고 나머지 강관 및 그라우트재 구성요소내의 타설 초기응력은 존재하지 않는 것으로 하였다. 즉,

$$\begin{aligned}\sigma_h &= \sigma_{gound}\\ \sigma_{ground\ constituent} &= \sigma_{ground}\\ \sigma_{pipe\ constituent} &= 0\\ \sigma_{grout\ constituent} &= 0\end{aligned} \tag{30}$$

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

5. 강관다단 그라우팅 보강지반의 이방성 매질 특성

5.1 보강지반체의 체적변화에 따른 보강지반의 이방성 보강체 물성의 변화

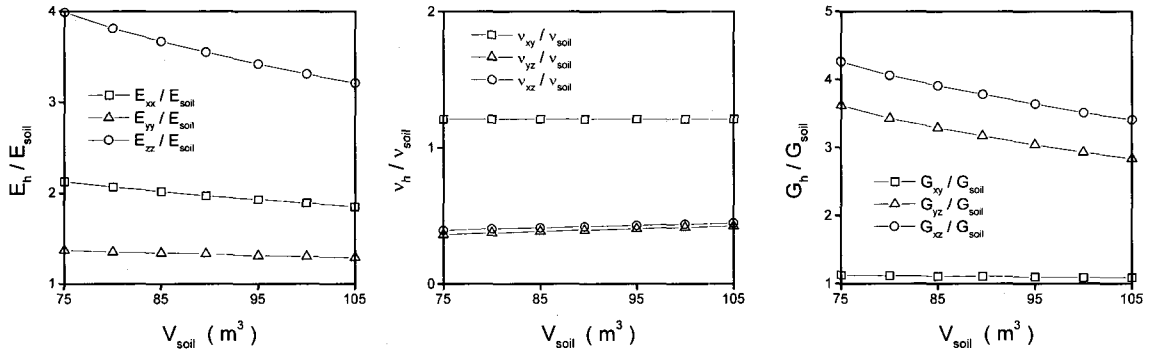
본 연구에서는 각 보강 요소매질들의 체적율 변화에 대한 보강지반체의 이방성의 변화추이를 고찰하여 보았다. 따라서 강관, 그라우트재와 원지반 중 한 보강매질의 절대 체적을 변화시키고 다른 두개의 매질의 체적변화는 없는 것으로 가정하였다. 이때, 지반요소의 체적이 변화할 때는 다른 두 보강체의 체적 변화는 없고, 강관 및 그라우트재의 체적이 변화한다면 상대적으로 지

표 1. 매개변수 연구에 사용된 물성 (이준석 등, 2000)

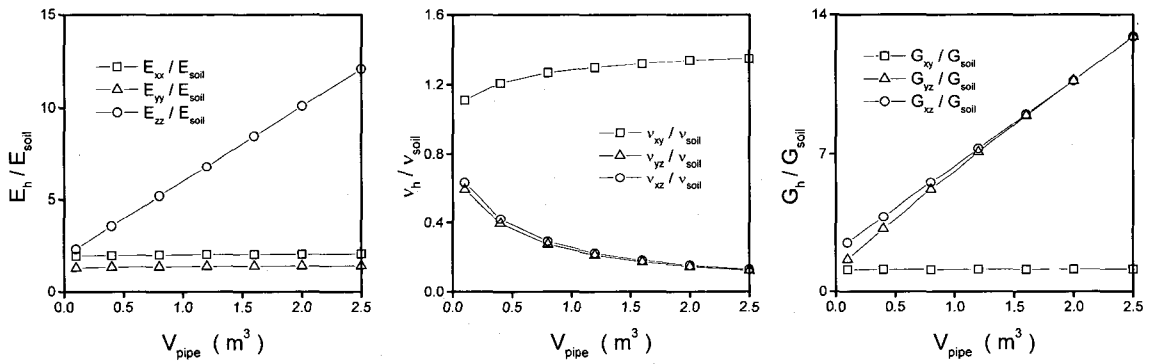
구성매질	탄성계수 (MPa)	포아송비	체적 (m^3)
원지반	500	0.33	89.6
그라우트재	5,000	0.17	10.0
강관	200,000	0.25	0.4

반의 체적은 줄어드는 것으로 하였다. 이러한 배경으로 각 매질의 체적비를 계산하였으며 사용된 지반 및 각 보강요소들의 기본 물성은 표 1과 같다.

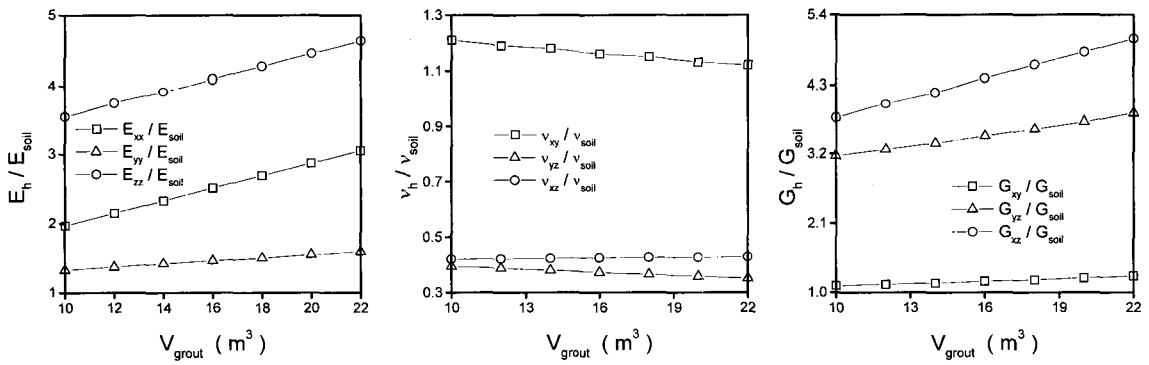
또한, 본 연구에서는 사전에 보강영역이 설정된다 하더라도 설정된 보강영역이 해석결과에 크게 영향을 미치지 않고 오직 타설되는 보강재의 강성도와 투입 체적이 터널 거동에 지배적으로 작용하도록 모델링 하고자 하였다. 따라서 유한요소 해석을 위한 입력자료로서 지반과 보강재들의 물성과 투입 절대 체적이며 선정된 보강영역의 체적을 유한요소코드 내에서 자체 계산토록 하였다. 이렇게 자동 계산된 보강영역의 체적에 대해 주어진 각 보강재의 절대 체적을 이용하여 코드내에서 각 보강요소들의 체적비가 자동 계산되어 해석에 적용함으로써 보강영역이 다소 넓거나 좁게 설정된다고 하더라도 그에 따라 보강재의 체적비가 자동으로 줄어들거나 커지므로 궁극적인 터널거동에는 큰 영향을 미치지 않게 된다.



(a) 지반요소의 체적비 변화에 따른 탄성상수들의 변화



(b) 강관요소의 체적비 변화에 따른 탄성상수들의 변화



(c) 그라우트요소의 체적비 변화에 따른 탄성상수들의 변화

그림 5. 각 보강체 구성매질의 체적비 변화에 따른 보강체의 이방 특성

그림 5(a)에서와 같이 강관 및 그라우트재의 투입 체적값들이 고정되었을 때 보강영역이 넓어질수록 즉, 보강지반의 체적이 커질수록 각 방향의 탄성계수값은 줄어드는 경향을 보인다. 이는 보강지반의 탄성계수값이 보강지반 영역의 체적에 반비례하여 감소함으로, 해석 시 설정된 보강영역이 터널 거동에 미치는 민감도를 최소화 할 수 있을 것이다. 역시 그림 5(a)에서 보여지는 것과 같이 전단 계수값도 지반의 체적이 커짐에 따라 감소하는 경향을 보인다. 그림 5(b)에서는 강관의 체적이 증가할수록 터널 축방향으로의 강성이 크게 증가하며 다른 방향으로의 강화효과는 거의 없는 것을 보여준다. 이는 보강지반의 복합체 모델 유도 시 설정된 강관의 기하형태로부터 기인된 것이라 사료되며, 강관의 보강력 증가, 즉 강관 물성의 강화나 체적의 증가는 오직 터널 축방향의 지반강화 효과에만 지배적으로 영향을 미친다. 그림 5(c)는 기존 연구에서 보여준 결과(이준석 등, 2000)와 차별화된 결과를 보여주고 있다. 여기서, 보강지반의 체적과 강관의 체적이 고정된 상태에서 그라우트재의 주입체적이 증가함에 따라 터널 축방향과 횡방향의 보강효과는 같은 비율로 증가한다. 하지만 터널 수직방향의 보강효과에는 크게 영향을 미치지 않으며, 이러한 경향은 전단계수의 경우에서도 찾아볼 수 있다.

5.2 강관 다단 그라우팅 공법의 설계인자들에 대한 매개변수 연구

5.2.1 기본 모델 설정

본 장에서는 강관 다단 그라우팅 공법의 주요 설계인자들이 터널 거동에 미치는 민감도를 고찰해 보고자 한다. 이를 위하여 그림 6에서와 같이 총 5,657개의 절점들과 1,152개의 20절점 블록요소들로 구성된 3차원 유한요소망을 작성하였다. 설정된 가상 터널모델의 규모는 폭 10m, 높이 10m의 마제형 터널이며 지표하 10m에서 굴진해 나가는 것으로 가정하였다. 또한 굴착 단계별로 타설되는 강관 다단 그라우팅 보강영역은 두께 3m로 설정되었다. 사실상 작성된 유한요소망은 계산의 정확도를 위해 경계면들을 충분히 이격시켰거나 충분한 요소수로 분할되었다고 볼 수 없으나 계산시간을 고려하여 요소망을 최소화 하였다.

요소망의 측면들은 면에 수직한 방향으로의 변위가 구속되었으며 바닥면의 수직방향 변위 또한 구속되었다. 각 3m의 굴진장으로 총 16단계의 굴착단계를 설정하였으며 한 단계씩 순차적으로 굴진 및 보강해 나가도록 하였다. 또한 탄성이론에 근거하여 각 지점의 깊이와 지반의 단위중량을 이용해 초기응력을 발생시켰다.

본 연구에서는 각 설계인자들의 변화에 대한 보강효과의 비교가 목적이므로 계산시간을 고려해 탄성해석을 근간으로 매개변수 연구가 수행되었다. 각 굴착단계마다 선 보강되는 강관다단 그라우팅의 제원은 기 설정된 설계인자들에 의해 달라지게 적용된다. 본 매개변수 연구에서 고찰되는 설계인자들 및 사용된 인자들의 값들은 다음과 같다:

(1) 강관의 각도 (0°, 10°, 20°, 30°)
(2) 강관다단의 중첩길이 (0m/12m, 6m/12m, 3m/12m)
(3) 강관의 길이 (6m, 12m, 18m)

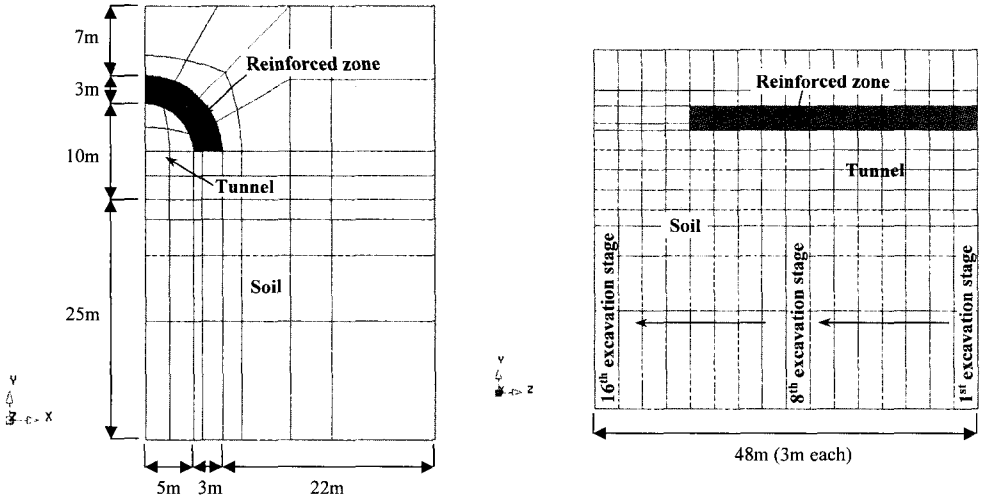


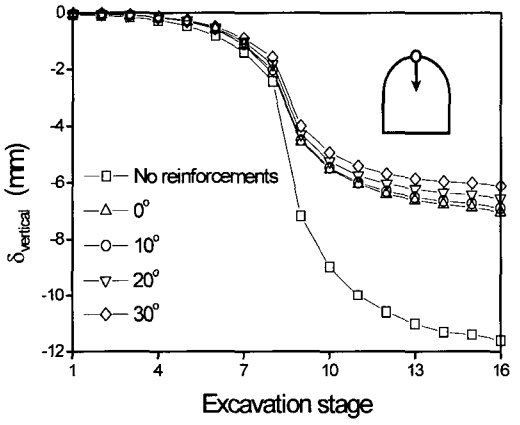
그림 6. 매개변수연구를 위해 설정된 가상 터널 모델

여기서 밑줄로 표시된 인자값들은 한 인자값들이 변화할 때 고정된 기본값들이다. 사용된 지반과 강관 다단 그라우팅 보강매질들의 기본 물성값은 표 1과 같다. 이때 무 보강지반은 표 1의 지반물성으로 정의되며 보강영역의 복합 이방성 물성값들은 표 1에서 제시된 3개의 보강지반 구성매질들의 물성을 기반으로 정의된다.

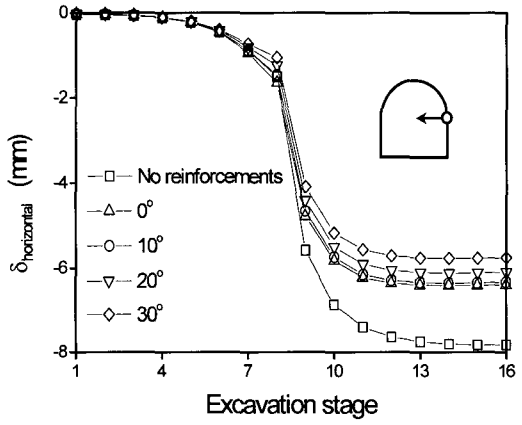
5.2.2 강관의 타설각도

본 절에서는 강관의 타설각도에 대한 민감도를 고찰키 위해 그림 3에서 정의된 해석의 입력값인 β값을 변화시키며 매개변수 연구가 수행되었다. 이때 터널단면의 횡방향 기울기인 θ는 작성된 유한요소 코드내에서 터널축을 중심으로 자동으로 계산되며 유한요소망의 재작성은 요구되지 않는다.

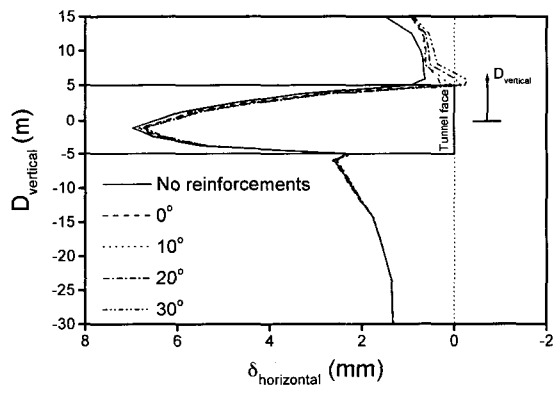
그림 7(a)에서는 터널 굴착 시점부로부터 24m 떨어진 지점의 터널 직상부에서 전 굴착단계를 통해 계측된 수직변위를 보여준다. 여기서, 강관의 타설각도 변화에 반비례하며 터널 천단침하가 발생하였으며 약 39%-47%정도의 침하억제 효과를 보인다. 그림 7(b)에서는 8단계 굴착 후 터널 측벽부에서 발생한 수평변위들을 설정된 강관의 길이별로 비교하였다. 여기서 수평변위의 강관길이별 억제효과는 18%-26% 정도이며 그 발생경향은 그림 7(a)의 것과 비슷하다. 그림 7(c)에서는 8단계 굴착 후 터널 막장면의 수평변위들을 비교하였다. 여기서, 강관 다단 그라우팅 보강이 터널 상부에만 시공이 되었으므로 터널 천단부에서만 막장 수평변위 억제효과가 나타나고 있다. 막장 천단부의 수평변위는 타설각도가 증가하면서 점점 억제되며 20도 이상의 경우부터 터널 막장 천단부가 굴진방향으로 밀리는 현상을 보이고 있다. 이는, 보다 큰 각도로 경사타설 됨에 따라 터널 천단부와 터널 인버트부에서 발생하는 상대변위의 차가 커짐으로 발생되는 터널 막장면이 축방향으로 회전하는 현상에 기인한다고 판단된다. 이러한 현상은 터널 안정성에 불리하게 작용될 것이다. 즉, 강관의 시공시 보강영역의 수평변위는 명확히 억제되나, 터널 막장주변에의 전단응력분포에 불리하게 작용할 것이다. 따라서 이러한 막장의 회



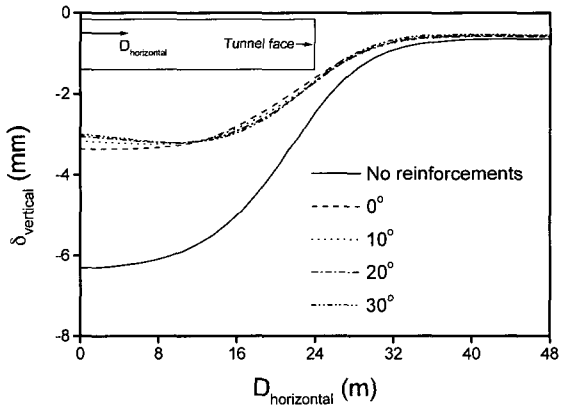
(a) 터널 천단부의 수직변위



(b) 터널 측벽부의 수평변위



(c) 터널 막장면의 수평변위



(d) 지표침하

그림 7. 강관의 타설각도 변화에 따른 굴착단계별 터널거동 추이

전을 방지하기 위해서는 터널 막장 인버트부에서 발생되는 수평변위가 억제되어야 할 것 이며, 이에 대한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것이라 사료된다.

그림 7(d)는 터널이 8막장 진행한 후 터널 직상부에서의 터널 축방향 수직 지표침하분포를 보여주고 있다. 여기서 강관다단에 의한 지표침하 억제효과는 46%-52%로 터널 천단침하 억제효과 보다 약간 높게 나타났다. 이로부터 강관다단 그라우팅 보강은 터널 막장의 안정성 뿐만 아니라 지표면의 침하억제 효과에도 무척 크게 작용함을 알 수 있다. 하지만 각 강관길이별 지표침하 억제효과는 약 4%정도로 그리 크지 않는 것으로 해석되었다.

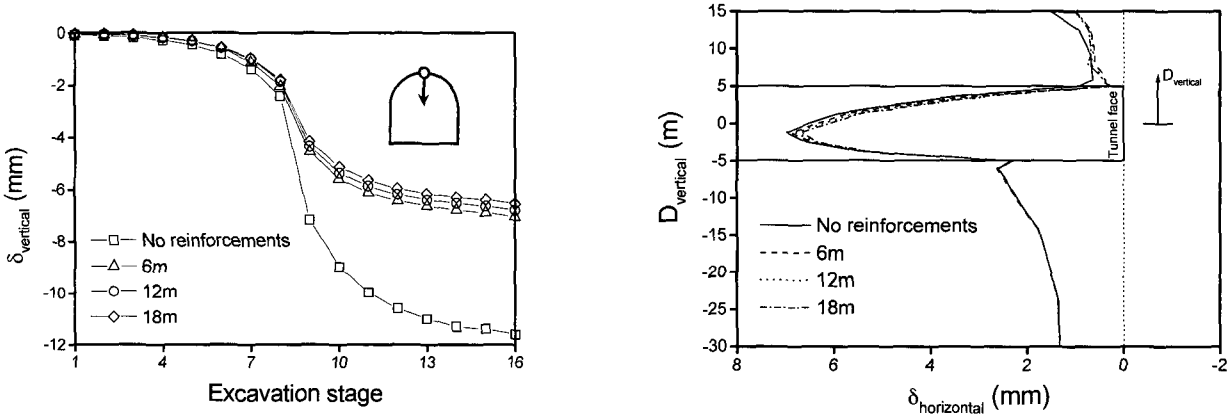
물론 이상과 같은 해석결과들은 설정된 지반 물성치들과 발생된 초기응력에 의해 크게 영향을 받을 것이므로, 본 보조공법의 설계 시 마다 주어진 지반조건과 다양한 현장조건들을 고려해 신중히 그 보강효과의 예측이 수행되어야 할 것이다.

5.2.3 강관의 길이

본 절에서는 주요한 강관다단 그라우팅 공법의 설계인자인 강관의 길이를 대상으로 매개변수 연구가 수행되었다. 해석된 결과는 설정된 강관의 길이별로 그림 8에서 비교하였다. 여기서 보강에 의한 전체적인 터널의 천단침하 억제 수준은 그림 7의 경우와 비슷하였지만 강관길이가 보강효과에 미치는 민감도는 그리 크지 않다. 또한 터널 막장면의 수평변위 변화 추이로부터 강관의 설치에 의한 수평변위 억제 효과는 60%수준으로 명확하나 강관길이의 차이에 대한 수평변위 억제효과는 거의 없음을 알 수 있다. 이는 강관의 중첩은 없는 것으로 가정하였으므로 강관이 길이가 길어질수록 설치되는 막장간격이 길어진다는 조건하에서의 결과이다.

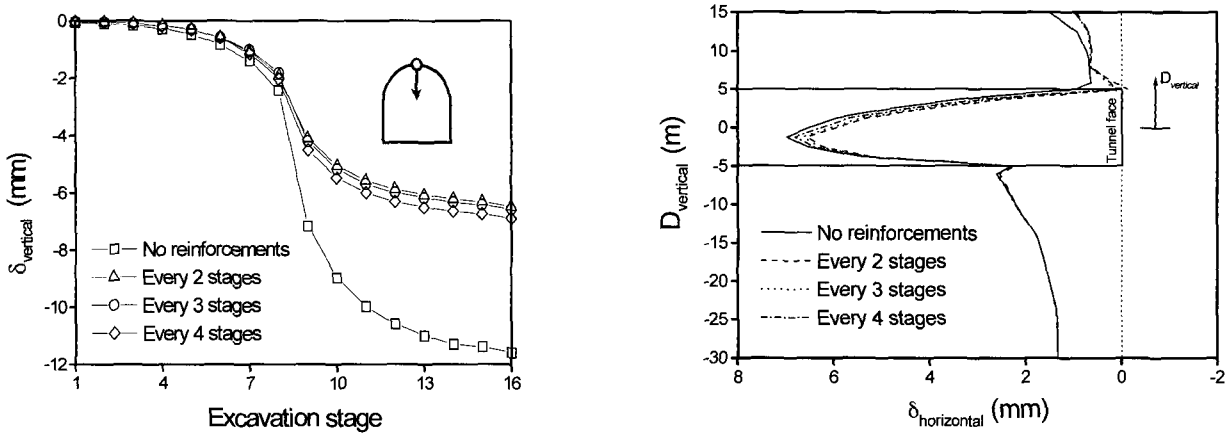
5.2.4 강관의 중첩길이

제안된 해석기법을 이용하여 강관의 중첩효과를 모



(a) 터널 천단부의 수직변위 (b) 터널 막장면의 수평변위

그림 8. 강관의 길이 변화에 따른 굴착단계별 터널거동 추이



(a) 터널 천단부의 수직변위 (b) 터널 막장면의 수평변위

그림 9. 강관의 중첩길이 변화에 따른 굴착단계별 터널거동 추이

사하기 위하여, 주어진 요소망의 재 작성 없이 간단하게 중첩된 보강영역내의 강관 체적비를 증가시키고 해석을 수행한다. 이때 2열로 중첩된 보강영역내의 강관 체적은 표 2에서 제시된 체적의 2배이며 상대적으로 지반의 체적비는 증가된 강관의 체적만큼 줄어든다. 이러한 방식을 통해 해석된 결과들을 그림 9에 도시하였다. 여기서, 5.2.3절에서와 같이 터널 천단침하의 억제효과는 명백하나 중첩길이의 차이에 따른 천단침하 억제수준은 미비했다. 하지만 그림 9(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 중첩길이가 길어질수록 터널 막장면 수평변위의 억제효과는 상당히 커진다.

6. 강관 다단 그라우팅 보강지반의 탄소성 거동 특성

6.1 인장력에 대한 강관다단 그라우팅 보강지반체의 탄소성 거동 특성

본 장에서는 유도된 강관 다단 그라우팅 보강지반체의 탄소성 거동 특성을 알아보고자 한다. 우선적으로 1개의 20절점 강체요소에 유도된 보강지반 모델을 적용하고 한 방향으로 인장력을 가해줌으로써 발생하는 보강지반체의 인장응력 변화양상을 고찰하여 보았다. 이때 적용된 요소의 인장력과 경계조건은 그림 10에 도시하였으며 적용된 각 보강요소들의 탄소성 물성값들은 표 2와 같다.

또한 보강지반체의 각 구성매질들인 지반과 그라우트재들에 대한 항복함수로써 일반적인 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였으며 associative flow rule를 적용함으로써 각 요소들의 팽창효과는 무시하였고 선형 강화법칙(linear hardening rule)을 사용하였다. 이때 강관은 탄성체로 가정하였다. 위에서 언급한 하중조건과 경계조건 하에서 다양한 강관의 타설각도 변화에 대한 인장응력의 변화곡선을 그림 10에 도시하였다.

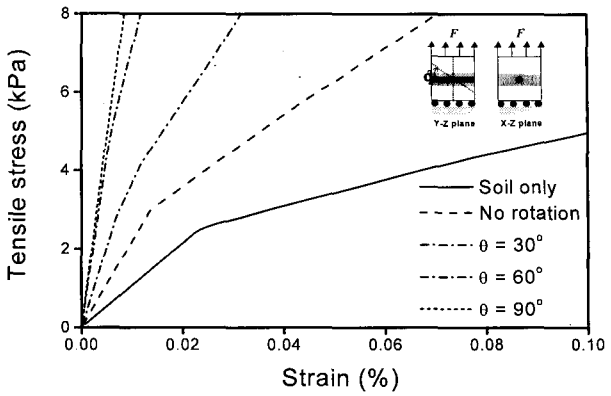


그림 10. 인장력에 대한 강관 다단 그라우팅 보강 지반체의 탄소성 거동 특성

의도된 바와 같이, 그림 10에서는 유도된 보강지반모델이 적용되었을 때, 탄성영역에서의 강성도와 더불어 항복 후의 소성거동의 강성도 또한 크게 증가하고 있음을 보여주고 있다. 이때 강관이 가해진 인장력에 수직하게 위치해 있는 경우에는 가해진 인장력에 대한 저항력의 증가가 보강요소 중 그라우트재의 강성에 의해 지배된다. 반면 강관이 가해진 인장력에 수평하게 위치한 경우, 매질의 거동은 강관의 강성도에 의해 지배된다.

6.2 강관 다단 그라우팅 공법이 적용된 터널의 탄소성 거동 해석

본 절에서는 유도된 보강지반 모델을 이용하여 강관 다단 그라우팅 공법이 적용된 터널의 탄소성 거동 특성을 고찰해 보았다. 이를 위하여 우선적으로 마제형 터널의 상반부 굴착을 모사하며 그림 11과 같이 3차원 유한요소망을 작성하고 다음과 같은 3가지 가상적인 상황을 설정하였다.

(1) 탄소성 지반을 무보강으로 굴착하는 경우

표 2. 설정된 지반 및 강관다단 그라우팅 보강매질들의 탄소성 물성값

매질	탄성계수(MPa)	포아송비	체적비(%)	점착력(MPa)	내부마찰각(°)	Hardening parameter
지반	4.90E+02	0.33	-	0.1	25	1.0E+08
지반 (보강체 구성매질 1)	4.90E+02	0.33	63	0.1	25	1.0E+08
강관 (보강체 구성매질 2)	2.00E+5	0.25	2	-	-	-
그라우트재 (보강체 구성매질 3)	4.90E+03	0.17	35	0.2	30	1.0E+10

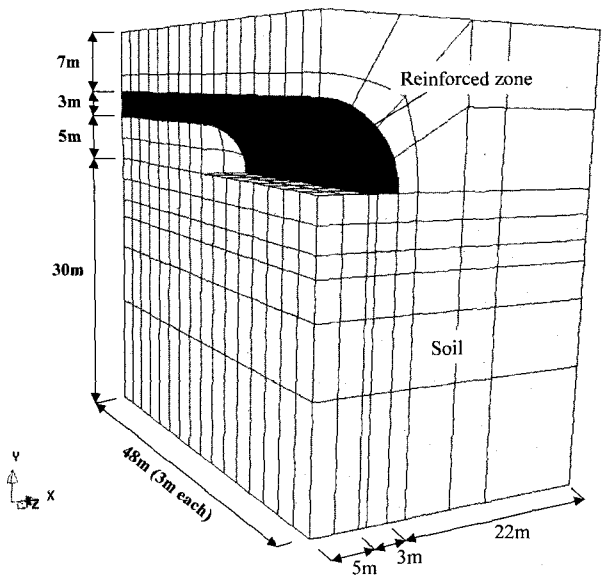


그림 11. 상반부 굴착 모델의 3차원 유한요소망

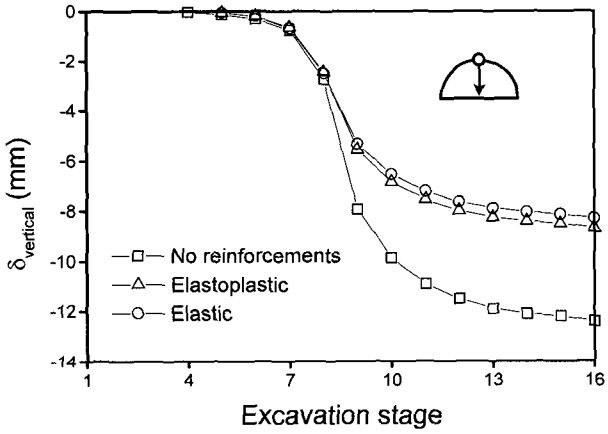


그림 12. 해석 모드별 터널 천단 침하량의 비교

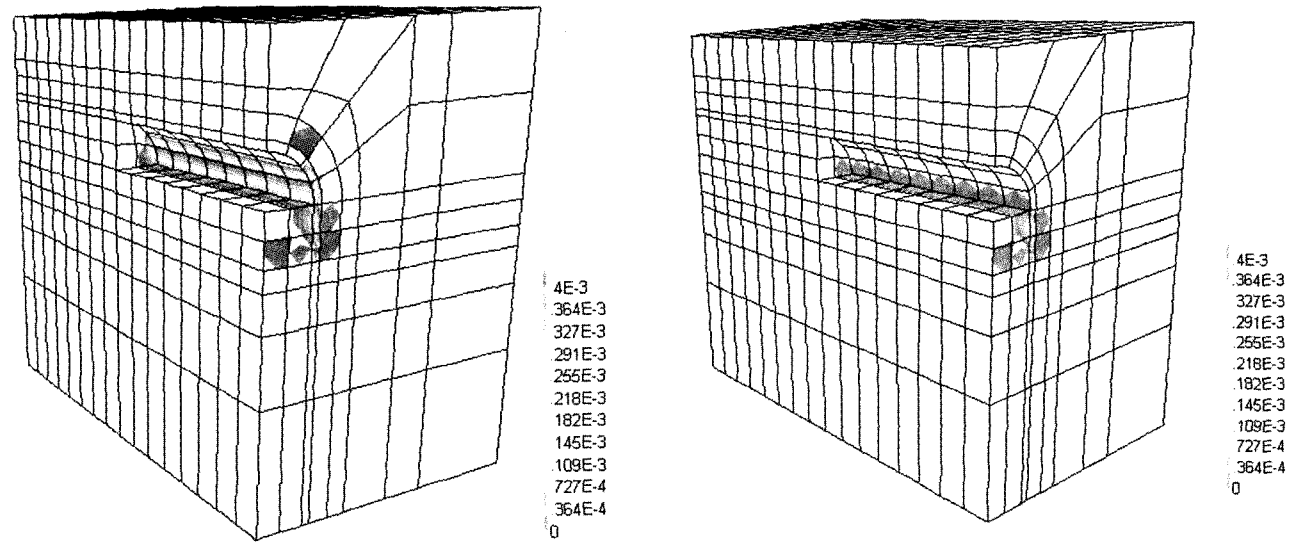
(2) 탄소성 지반을 유도된 탄소성 강관 다단 그라우팅 보강지반 모델로 선보강하며 굴착하는 경우

(3) 탄소성 지반을 탄성 강관다단 그라우팅 보강지반 모델로 선보강하며 굴착하는 경우

이때, 적용된 경계조건은 모델의 상부 면을 제외한 모든 외곽면들은 그 면에 수직한 방향으로의 변위가 구속되었다. 굴착 전 가정된 단위중량(22 kN)과 측압계수(K_0=0.3)을 이용하여 초기응력을 발생시키고 3m 굴진장으로 16번의 굴착단계를 통해 굴착해 나가는 것으로 하였다. 여기서 굴착 단계별로 터널 측방과 상단부의 일부영역이 강관 다단 그라우팅으로 보강된다. 사용된 지반과 강관 다단 보강지반 구성매질들의 탄소성 물성값들은 표 2와 같으며 12m의 강관을 매 4막장마다 10도로 경사타설해 나간다.

그림 12에서는 터널 굴착 시점부로부터 24m 떨어진 지점의 터널 직상부에서 전 굴착단계를 통해 계측된 수직변위를 보여준다. 위에서 설정된 터널조건에서 약 35%정도의 터널 천단침하에 대한 보강효과가 나타났으며, 탄성과 탄소성 보강체에 대한 천단침하량의 차이는 약 10%수준으로 해석되었다. 이러한 탄성과 탄소성모델에 대한 결과의 차는 주어진 지반조건이 취약할수록 커질 것이므로 취약한 지반에서는 보다 안전측 설계를 위하여 탄소성해석이 필수적이라 사료된다.

특히 유도된 탄소성 강관 다단 그라우팅 보강지반 모델이 적용된 경우는 보강영역이 하나의 매질, 즉 하나의 보강지반으로 정의된다 하더라도 그 보강지반체를 구



(a) 무보강 (b) 보강

그림 13. 보강 및 무보강 터널에서 발생되는 소성영역의 분포 경향

성하는 구성요소들에 개별적으로 탄소성 모델이 적용될 수 있다. 따라서 터널굴착에 따라 발생되는 지반과 다양한 보강 구성매질들의 소성 변형율 또한 개별적으로 얻어질 수 있다. 이들 중, 그림 13에서는 대표적으로 보강된 경우와 보강이 수행되지 않은 두 경우에서 발생되는 지반의 소성영역을 보여주고 있다. 여기서, 주어진 취약한 지반의 굴착에 의해 발생이 예상되는 터널주변의 소성영역이 강관 다단 그라우팅 보강에 의해 최소화되는 현상을 명확히 볼 수 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 복합체 역학(composite mechanics)분야에서 일반적으로 사용되고 있는 균질화 기법(homogenisation technique)을 도입하여 강관과 그라우트재로 보강되는 지반을 복합체 개념으로 모형화하고 탄소성 매질모델을 유도하였었다. 이때, 유도된 보강지반 매질은 각 보강 구성요소들의 기하학적 배열특성, 강성도 행렬과 체적비의 함수가 된다. 또한 모형화된 보강지반의 매질축에 대하여 좌표변환 개념을 도입함으로써 강관 다단 그라우팅 보강공법의 주요 설계인자 중 하나인 타설각도를 요소망의 재작성 없이 쉽게 유한요소해석에 고려할 수 있도록 하였다. 이러한 과정으로 유도된 보강지반의 매질모델은 표준 3차원 유한요소 프로그램으로 코드화 하였으며 이를 통해 다양한 설계인자들을 고려하여 강관 다단 그라우팅 보강에 대한 터널 거동해석을 손쉽게 수행할 수 있다. 이때 불명확한 복합 보강지반의 역학적 특성은 잘 알려진 각 구성매질들의 물성에 의해 정의될 수 있으므로 보강지반의 물성 산정 시에 발생될 수 있는 오류들을 최소화 할 수 있을 것이다.

또한 균질화 기법에 기반한 새로운 탄소성 해석 알고리즘을 제안함으로써, 각 구성매질의 응력수준이 탄성한계를 넘어 소성 변형율이 발생한다 하여도 각 하중재하단계마다 설정된 응력평형 및 변형율 적합조건식들이 항상 만족할 수 있도록 하였다. 이는 각 구성매질의 탄소성 강성도 행렬이 수정될 때 마다 구조행렬들을 경신하도록 하는 방안을 사용하였다. 또한 터널의 단계별 굴착 및 보강을 적절히 모사하기 위하여 유도된 모든 균질화 과정을 응력 및 변형율의 증분에 대하여 적용하였다. 이를 통해 복합 보강지반체의 직접적인 탄소성 거동특성을 모사하기 위해 수반되는 많은 어려움들을 해결하였다.

본 연구에서 작성된 3차원 탄소성 강관다단 그라우팅 유한요소 모델을 이용하여 다양한 매개변수 연구가 수행되었다. 우선적으로, 강관 다단 그라우팅 공법의 주요 설계인자인 강관의 제원과 수량 그리고 설치간격(C.T.C.) 그리고 그라우트 주입량 등의 보강효과들을 모사하기 위해 각 매질의 체적비가 해석의 입력자료로 사용될 수 있으므로 쉽게 본 설계인자들에 대한 매개변수연구를 수행할 수 있다. 이로 부터, 유도된 보강지반의 이방성 특성이 합리적으로 구현되고 있음을 알 수 있었다. 또한, 가상 터널 유한요소모델을 이용하여 다른 주요 설계인자들인 강관의 길이, 강관의 타설각도 그리고 중첩길이 등과 같은 설계인자들에 대해서도 매개변수 연구가 수행되었다. 이로 부터, 주어진 지반조건에 대해 강관 다단 그라우팅 보강을 통하여 대략 50%정도의 터널 천단침하 및 지표침하 억제효과를 기대할 수 있는 것으로 해석되었다.

마지막으로, 코드화된 보강지반의 탄소성 모델을 이용하여 인장력에 대한 강관의 타설 각도별 보강지반의 탄소성 거동특성을 고찰하였다. 이로부터 강관이 가해진 하중에 대해 수직하게 위치해 있다하여도 주입된 그라우팅에 의해 탄성 강성율 뿐 만 아니라 소성거동에도 보강효과가 나타났으며, 하중이 가해진 방향과 강관의 방향이 일치했을 때는 강관의 강성도에 의해 보강체의 거동이 지배됨을 알 수 있었다.

본 연구에서 수행된 모든 매개변수 연구는 가정된 터널과 지반조건하에서 수행되었으며, 주어진 터널 및 지반조건에 따라 강관 다단 그라우팅의 보강효과와 초래되는 터널 거동특성은 다르게 될 것이다. 또한 본 연구에서 제시된 균질화 수치모델을 보다 체계적으로 검증하고 활용하기 위해서는 모형실험이나 현장 계측자료를 이용한 보다 현실적인 검증작업이 요구된다. 이는 현재 저자들의 연구그룹에서 수행중이며 추후에 논문 등을 통해 보고 될 것 이다.

참 고 문 헌

1. 김무일(1995), "RPC공법의 설계와 시공에 관한 연구", 서울 산업대학교 건설재해 예방 연구소, 연구보고서.
2. 김창용, 배규진, 문현구, 최용기(1998), "Umbrella Arch공법이 적용된 터널의 3차원 유한요소 해석에 관한 연구", 터널과 지하공간, 제8권, pp.209-225.
3. 방춘석, 이준석, 이상덕(2001), "그라우팅 및 강관다단 병용공법의 설계기법에 관한 연구", 한국토목공학회논문집, 제21권, 제5-C호, pp.487-494.

4. 이봉렬, 김형탁, 김학문(1996), "3차원 터널해석에 의한 강관보강형 다단 그라우팅의 보강효과", 한국지반공학회지, 제12권, pp.5-20.
5. 이종우, 이준석, 김문겸(1996), "그라우팅에 의한 터널 보강효과의 해석적 연구", 터널과 지하공간, 제6권, pp.298-305.
6. 이준석, 방춘석, 엄주환(1997), "그라우팅 보강터널의 탄소성 해석에 관한 연구", 한국토목공학회논문집, 제17권, 제III-5호, pp. 531-539.
7. 이준석, 방춘석, 최일윤, 엄주환(2000), "터널용 강관다단공법의 설계기법에 관한 연구", 한국토목공학회논문집, 제20권, 제3-C호, pp.305-314.
8. Bernaud, D.(1995), "Numerical simulation of the convergence of a bolt-supported tunnel through a homogenisation method", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.19, pp.267-288.
9. Hill, R.(1963), "Elastic properties of reinforced solids: some theoretical principles", *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.11, pp.357-372.
10. Kotake, N., Yamamoto, Y. and Oka, K.(1994), "Design for Umbrella method based on numerical analysis and field measurements", *Proc. Tunnelling & Ground Conditions, Ed. M. Abdel Salam*, pp.501-508.
11. Schweiger, H.F. and Pande, G.N.(1986), "Numerical analysis of stone column supported foundation", *Computers and Geotechnics*, Vol.2, pp.347-372.
12. Zienkiewicz, O.C. and Pande, G.N.(1977), "Time-dependent multilaminate model of rocks-a numerical study of deformation and failure of rock masses", *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.1, pp.219-247.
13. Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L.(2000), "Finite element method", fifth edition, Volume 1-3, London, McGraw-Hill Book Company.

(접수일자 2003. 7. 25, 심사완료일 2003. 11. 24)