

흙막이 구조물(Ⅲ)

이 승 래*

3. 수치해석

3.1 개 요

컴퓨터를 이용하여 흙막이 구조물을 설계하고자 할 때 이용할 수 있는 방법은 여러가지가 제안되어 왔다. 흙막이 구조물과 같은 지반-구조물 상호작용 시스템을 갖는 지반-구조물의 거동은 여러 요소들에 의해 영향을 받으며, 이들 요소들의 영향으로 인하여 매우 다른 복잡한 거동을 나타내므로 이론적으로 이러한 모든 요소들을 고려하여 설계에 반영하는 것은 매우 어려울뿐 아니라 비경제적인 설계 방법을 초래할 수 있다. 최근 들어 컴퓨터의 눈부신 발달과 더불어 관련된 수치해석 방법들이 많이 제안되어, 이들을 이용하여 당면한 여러 공학적인 문제들을 효율적으로 해결하는 것이 가능해졌다. 이러한 추세로 흙막이 구조물 설계를 위한 컴퓨터 소프트웨어들이 많이 개발되어 왔으며 실제 설계에 많이 이용되고 있는 실정이다.

그러나, 이러한 컴퓨터 소프트웨어들을 이용하여 흙막이 구조물을 설계하고자 할 때는 각 소프트웨어들이 가진 특성 및 해석방법들을 정확히 이해하여 대상 문제의 적용성 및 효

율성을 검토하는 것이 필수적이다. 따라서 본 강좌에서는 기존의 여러 컴퓨터 소프트웨어들이 많이 사용하고 있는 흙막이 구조물 설계 방법들에 대하여 기술하고 실제 흙막이 구조물과 같은 지반-구조물 상호작용 시스템을 갖는 지반구조물의 거동예측을 위하여 사용되는 이들 방법들의 적용성 및 문제성 등을 요약해 보고자 한다.

3.2 흙막이 구조물과 관련된 문제

흙막이 구조물의 종류와 관련된 여러 공법들은 이미 '설계 계획 및 조사' 강좌에 기술된 바 있다. 일반적으로 흙막이 구조물은 벽체라 통칭할 수 있는 구조물을 지반내에 설치하고 굴착 진행과정에 따라 각 지반에 적합한 여러 형태의 벽체 지지구조물을 통해 벽체를 지지하는 방법을 이용하여 이루어진다. 이와 같은 지반-구조물을 설계하기 위해서는, 벽체배면에 있는 지반과 지하수 및 각종 상재하중에 의해 벽체 및 지지구조물에 주어지는 하중을 산정하는 것이 필요하다. 그러나 이러한 하중의 분포는 벽체 및 지지구조물의 강성과 흙막이 구조물 설치과정 등에 따라 달라지므로 그 해석은 지반-구조물 상호작용 문제를 고려하여 수행되어야 한다.

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 조교수

이러한 지반-구조물 상호작용 문제는 실제 거동에 영향을 미칠 수 있는 요소들이 매우 많으므로 그 해석이 용이하게 이루어 질 수 없다. 이제까지 이용되어 오고 있는, 컴퓨터를 이용한 흙막이 구조물의 설계 방법들은 크게 두 가지로 대별될 수 있다. 첫번째 방법은 비교적 단순화된 방법으로 실제 지반거동을 묘사하기 위하여 벽체배면의 실제 지반으로부터 벽체 및 지지구조물에 작용되는 하중을 산정하여 직접 벽체 및 지지구조물에 작용시키고 굴착 저면 지반에 의해 지지될 수 있는 반발력은 대응되는 지반 스프링으로 묘사하여 대치함으로써 벽체 및 지지구조물의 안정성(모멘트, 전단력, 허용응력 등)을 검토하는 방법으로 본 강좌에서는 이를 '간편법'이라 칭하고자 한다. 이와 반하여 이용되는 다른 방법으로는 벽체 및 지지구조물뿐만 아니라 실제 지반 자체를 고려할 수 있도록 대상지반의 응력-변형률 관계를 이용하고 지반과 구조물 사이에 작용하는 상호작용 등을 고려하여 해석하는 방법이다. 이를 위하여는 여러 수치해석 방법들(유한차분법, 유한요소법, 경계요소법 등)이 이용될 수 있으며 본 강좌에서는 유한요소법에 의한 해석방법에 대하여 기술하고자 한다. 위의 두 방법들의 적용 가능성은 관련 지반 구조물의 중요성, 공사 규모, 경제성, 효율성 및 지반조사 결과 등을 고려하여 채택되어질 수 있다.

3.3 간편법

간편법을 이용한 흙막이 구조물의 설계는 주어진 하중과 지반의 성질에 대하여 주로 벽체 및 지지구조물의 구조계산을 행함으로써 이루어진다. 작용하는 하중에 대하여는 전 강좌 '흙막이벽에 작용하는 토압'에서 자세히 다루어졌다. 여러 간편법들 중 가장 간단한 방법으로는 고전 토압론을 이용하여 하중을 산정하고 가상 지지점과 버팀대의 위치를 지지점으로 한 연속보 또는 단순보로 가정하여 흙막이 벽체단면에 대한 구조계산 및 변위를 산정하는 방법이

있으나, 일반적으로 이러한 해석방법은 굴착 및 지지구조 설치가 완료된 후를 가정한 것이므로 실제의 거동과는 다른 하중상태와 변위형태를 나타내므로 컴퓨터를 이용한 방법으로는 잘 사용되지 않고 있다. 따라서 본 강좌에서는 현장상태의 흙막이 벽체에 작용하는 실측된 토압을 고려하여 하중을 산정하고 지반 및 지지구조물을 스프링으로 대치하여 설계하는 방법들에 대하여 기술하고자 한다.

3.3.1 탄성법

탄성법을 이용하여 흙막이 구조물을 설계하고자 할 때는 일반적으로 굴착저면 윗부분의 벽체배면에 지반의 자중 및 상재하중등에 의한 하중분포를 여러가지의 제안된 방법에 의하여 산정하고, 버팀대나 앵커와 같은 지지구조물과 굴착저면 아래부분의 수동토압을 받는 지반의 지지를 대응되는 스프링으로 대치하여, 유한요소법 등의 방법으로 벽체단면 및 지지구조물의 구조계산을 행함으로써 벽체의 변위 및 지지구조물에 작용하는 하중 등을 산정한다. 이와같은 방법을 이용하는 경우 주된 관점은 벽체배면에 작용하는 하중분포의 산정과 지지 지반을 모델하는 스프링계수의 산정이다.

일례로서 굴착단계에서의 하중분포는 Rankine방법에 의하여 구하거나 굴착 및 지지구조 설치가 완료된 후에는 Peck에 의하여 제안된 것과 같은 경험적인 하중분포를 사용하기도 하며 이들 중 큰 값을 이용하여 산정하기도 한다.¹⁾

이와같은 흙막이 구조물의 형태에 따른 하중분포 및 그 크기에 관하여는 후속 강좌에서 자세히 다루어질 예정이다.

버팀대나 앵커와 같은 지지구조물의 스프링계수는 주어진 하중에 대하여 같은 변위를 유발하도록 하고 설치간격을 고려하여 다음과 같이 산정된다.²⁾

$$K_{st} = \frac{EA}{LS} \cos \eta \quad (1)$$

여기서 E: 지지구조물의 탄성계수

- A : 지지구조물의 단면적
- L : 지지구조물의 길이(자유롭게 늘어나거나 줄어들 수 있는 길이)
- S : 간격
- η : 수평면으로부터 기울어진 각도 (앵커의 경우)

벽체를 지지할 수 있는 굴착저면 지반의 스프링계수를 산정하기 위하여 여러 방법들이 제안되어 왔으며 이들에 대한 산정방법들은 '설계 계획 및 조사' 강좌에 자세히 기술되어 있다.

위와 같은 방법으로 산정된 하중 및 스프링계수들을 이용하여 벽체 및 지지구조물에 관한 구조해석을 행함으로써 벽체단면의 구조계산과 변위 및 지지구조물에 작용하는 하중 등이 산정된다. 흙막이 벽체에 유한요소법을 적용하여 탄성법을 이용한 컴퓨터 소프트웨어의 해석 방법은 다음에 기술되는 탄소성법과 유사한 방

법을 이용하므로 다음절에 자세히 기술된다.

3.3.2 탄소성법

탄성법에서는 흙막이 벽체의 횡저항이 벽체 변위에 비례하는 것으로 가정하므로 굴착저면에 가까운 부분에서는 횡저항이 주어진 지반의 수동토압을 초과할 수 있다. 이와같은 모순을 보완하기 위하여 탄소성법에서는 구해지는 횡저항이 수동토압을 초과할 수 없도록 제한하는 방법¹⁴⁾을 이용하거나 아래와 같이 지지지반의 거동을 나타내는 지반스프링의 변위를 구속함으로써 해결한다. 그림 1은 유한요소법을 적용하여 흙막이 구조물을 위와 같이 제안된 방법으로 해석할 수 있도록 Bowles이 제안한 컴퓨터 소프트웨어에서 사용하고 있는 해석방법을 나타내고 있다. 이에 대한 자세한 해석과정과 컴퓨터 프로그램 및 이에 대한 설명은 참고문헌 [2]에 기술되어 있다.

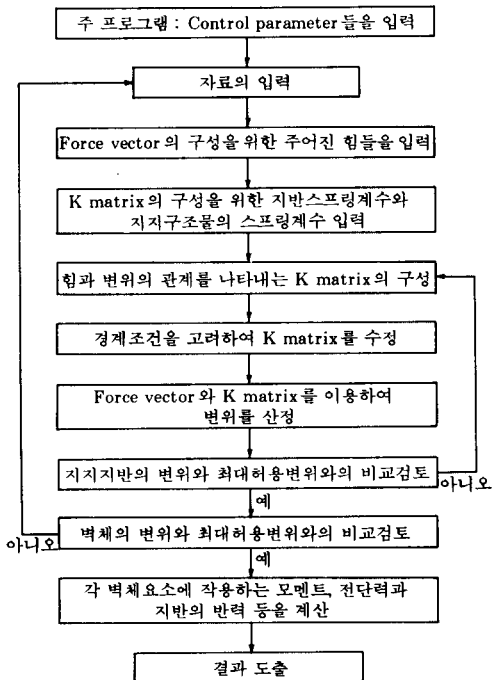


그림 1. 흙막이 구조물 해석 소프트웨어에서 사용하는 해석과정(탄소성법)

3.3.3 기 타

본 절에서 기술하고 있는 간편법을 이용하는 컴퓨터 소프트웨어들은 대부분이 흙막이 구조물의 벽체와 벽체 지지구조물의 안정성만을 검토하고 있다. 그 이외에도 흙막이 구조물의 안전한 설계를 위하여는 굴착저면의 안정성, 지하수의 흐름으로 인한 파이핑에 대한 안정성, 주변지반의 침하량뿐만 아니라 전체 지반-구조물의 안정성을 고려해야 한다.

이와 같은 안정성 검토를 위하여 많은 방법들이 제안되어 있으며³⁾ 본 강좌에서는 이들 방법에 대한 기술은 생략하기로 한다. 이러한 안정성들은 다음절에 기술하고자 하는 지반자체 및 지하수들을 고려할 수 있는 수치해석방법을 이용하는 경우 얻어지는 해석결과를 통하여 자연스럽게 검토될 수 있다. 특히 시공단계별 벽체의 변형량이 누적되고 이 변형량에 부합되는 작용토압을 계산함으로써 비교적 현장의 시공상태를 정확히 모델화 할 수 있는 수치해석법들

도 소개되고 있다.¹⁴⁾

3.4 유한요소법

컴퓨터와 수치해석 기법들의 눈부신 발달로 인하여, 유한요소법과 같은 방법을 이용함으로써 흙막이 구조물의 실제 현장지반에서 나타나는 지반-구조물 거동을 어느 정도 효율적으로 예측하는 것이 가능하여졌다. 그러나 이러한 방법을 이용하여 실제 지반의 흙막이 구조물을 해석하기 위해서는 대상 지반자체의 거동을 비교적 정확히 표현할 수 있는 지반재료의 응력-변형률 관계가 필수적으로 요구되며 이와 함께 사용되는 계수들의 정확한 도출이 얻어지는 결과의 타당성에 큰 영향을 미치게 된다.

일반적으로 유한요소법을 이용하여 흙막이 구조물의 거동을 해석하고자 할 때 그 결과에 영향을 미치는 주요한 요소들은 다음과 같다.

- ① 지하굴착 진행과정을 모델하는 방법
- ② 지반자체의 거동모델
- ③ 지반거동 모델에 사용된 모델계수 값들
- ④ 그외 실제 시공당시에 발생한 예상치 못했던 변화들

본 강좌에서는 위와 같은 요소들과 주로 관련된 문제들을 중심으로, 유한요소법을 이용하여 흙막이 구조물을 해석·설계하고자 할 때 해결하여야 할 여러 사항들에 대해 기술하고자 한다.

3.4.1 재래식 지하굴착 시뮬레이션 방법

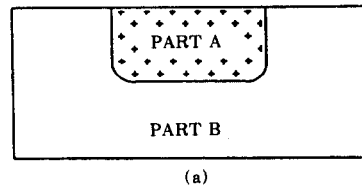
유한요소법을 적용한 지하굴착 과정을 모델하기 위하여 가장 널리 사용되어 왔던 방법은 그림 2에 나타난 바와 같은 간접적인 방법에 근거를 두고 있다. 이 방법을 이용한 지하굴착 시뮬레이션 과정은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- ① 주어진 자중과 하중에 의한 초기 변위, 변형률 및 응력들을 산정한다.
- ② 굴착되고자 하는 부분 A로부터 원지반 B에 전달되는 등가하중 τ_1 를 산정한다.
- ③ A지반과 관련된 부분의 강성도를 제거한다.
- ④ 굴착경계면 위에서 구해진 등가하중 τ_1 를

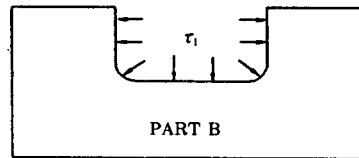
반대방향으로 작용시킨다.

- ⑤ 구해지는 변위중분, 변형률중분 및 응력중분을 전과정에서 구해진 변위, 변형률, 및 응력에 더하여 A지반 굴착과정으로 얻어진 결과들을 도출한다.

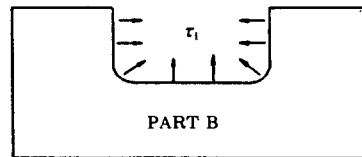
그러나 이와 같은 방법을 이용하여 구해지는 결과는 등가하중의 선택에 의해 매우 민감하게 되며, 등가하중은 일반적으로 보간법이나 경계면에서의 평형상태 등을 고려하여 구하므로 전체평형 관계를 위반하게 된다. 따라서 Ghaboussi와 Pecknold(4), Brown과 Booker(5), Borja 등(6)은 전체평형의 개념에 근거를 두고 탄성지반의 경우에 이론적으로 정확하게 적용할 수 있는 굴착 시뮬레이션 방법을 제안하였다. 특히 Borja 등은 전체평형개념을 수용하는 한편 여러 탄소성지반의 굴착해석까지 확장하였다.



(a)



(b)



(c)

그림 2. 재래식 지하굴착 시뮬레이션 방법

3.4.2 전체 평형방정식에 입각한 지하굴착 시물 레이션 방법

(1) 지배방정식

지반 구조상태를 흙과 물의 두 가지 상태를 나누어 고려할 때의 기본적인 편미분 평형관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot (\sigma + P\mathbf{1}) + \gamma_{\text{sat}} \mathbf{f} = 0 \text{ in } \Omega^{\text{wet}} \quad (2)$$

이에 상응하는 경계조건들은

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_g \text{ on } \Gamma_g \quad (3)$$

$$\mathbf{n} \cdot (\sigma + P\mathbf{1}) = \mathbf{h} \text{ on } \Gamma_h \quad (4)$$

여기서, P 는 공극수압, \mathbf{u}_g 는 주어진 변위벡터, \mathbf{h} 는 주어진 외부응력, \mathbf{n} 은 단위표면 수직 벡터를 표시한다. 식 (2)~(4)로부터 이에 상응하는 유한요소 행렬방정식을 유도하면 다음과 같은 형태로 나타난다.

$$(\mathbf{F}_{\text{INT}})_{n+1} - (\mathbf{F}_{\text{EXT}})_{n+1} = 0 \quad (5)$$

여기서,

$$(\mathbf{F}_{\text{INT}})_{n+1} = \int_{\Omega_{n+1}} \mathbf{B}_{n+1}^T \{ \sigma + P\mathbf{1} \}_{n+1} d\Omega_{n+1} \quad (6)$$

는 전체 내부 절점힘의 벡터이고

$$(\mathbf{F}_{\text{EXT}})_{n+1} = \gamma_{\text{sat}} \int_{\Omega_{n+1}} \mathbf{N}_{n+1}^T \mathbf{f} d\Omega_{n+1} + \int_{(\Gamma_h)_{n+1}} \mathbf{N}_{n+1}^T \mathbf{h} d\Gamma_{n+1} \quad (7)$$

는 전체 외부 절점힘의 벡터이며, $(n+1)$ 은 시간 $t = t_{n+1}$ 일 때의 값들을 표시한다.

(2) 반복기법을 이용한 해법

식 (5)에 Newton 방법을 적용하면 다음과 같은 반복적인 기법으로 변위의 증가분을 구할 수 있다.

$$\mathbf{F}'_{\text{EXT}}(\mathbf{d}_{n+1}^k) \Delta \mathbf{d}^k = (\mathbf{F}_{\text{EXT}})_{n+1} - \mathbf{F}_{\text{INT}}(\mathbf{d}_{n+1}^k) \quad (8)$$

$$\mathbf{d}_{n+1}^{k+1} = \mathbf{d}_{n+1}^k + \Delta \mathbf{d}^k \quad (9)$$

여기서 식(8)에 나타나는 Jacobian 매트릭스는 다음 식으로부터 구해진다.

$$\mathbf{F}'_{\text{INT}}(\mathbf{d}_{n+1}^k) = \int_{\Omega_{n+1}} \mathbf{B}_{n+1}^T \mathbf{C}_{n+1}^k \mathbf{B}_{n+1} d\Omega_{n+1} \quad (10)$$

여기서 탄소성 매트릭스 \mathbf{C}_{n+1}^k 는

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{n+1}^k &= \frac{\partial \{ \sigma \}_{n+1}^k}{\partial \{ \varepsilon \}_{n+1}^k} + \{ \mathbf{1} \} \left(\frac{\partial P_{n+1}^k}{\partial \varepsilon_{n+1}^k} \right)^T \\ &= (\mathbf{C}_{n+1}^k)_{\text{soil}} + (\mathbf{C}_{n+1}^k)_{\text{water}} \end{aligned} \quad (11)$$

이고, 주어진 응력이 다음과 같은 형태로 구해질 수 있다고 가정할 때

$$\sigma_{n+1}^k = \sigma_n + \delta_{n+1}^k (\varepsilon_{n+1}^k) \quad (12)$$

유효응력에 기초를 둔 흙의 탄소성 매트릭스 $(\mathbf{C}_{n+1}^k)_{\text{soil}}$ 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\mathbf{C}_{n+1}^k = \frac{\partial \{ \delta \}_{n+1}^k}{\partial \{ \varepsilon \}_{n+1}^k} \quad (13)$$

또한 공극수압 방정식은 다음과 같은 형태가 된다.

$$P_{n+1}^k = P_n + \lambda_w \text{tr}(\varepsilon_{n+1}^k - \varepsilon_n) \quad (14)$$

여기서 λ_w 는 물의 체적변형계수이며 위의 식으로 부터 물의 탄성매트릭스는

$$(\mathbf{C}_{n+1}^k)_{\text{water}} = \lambda_w \{ \mathbf{1} \} \{ \mathbf{1} \}^T \quad (15)$$

로부터 구해진다.

(3) 지하굴착 방법

위에서 유도된 기본 방정식은 비배수 혹은 완전배수 상태의 지하굴착 방법에 적용될 수 있으며 지하굴착 모델 방법은 다음과 같이 설명될 수 있다. 식(5)에 나타난 두 가지 힘의 벡터 \mathbf{F}_{INT} 과 \mathbf{F}_{EXT} 에 임의의 유한요소에 의한 영향을 고려해 보면,

$$\mathbf{F}_{\text{EXT}}^e = \gamma_{\text{sat}} \int_{\Omega^e} \mathbf{N}^T \mathbf{f}^e d\Omega^e \quad (16)$$

$$\mathbf{F}_{\text{INT}}^e = \int_{\Omega^e} \mathbf{B}^T \{ \sigma + P\mathbf{1} \} d\Omega^e \quad (17)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 유한요소에 외부절점힘(\mathbf{h})이 작용하지 않고 있다고 가정하였다. 전체영역 Ω 에서의 임의의 유한요소를 굴착하는 경우 그 유한요소내에 작용하는 위의 절점힘들의 식에서 유효응력, 공극수압, 자중 및 탄소성계수들을 제거함으로써 임의의 요소가 굴착되는 과정을 모델할 수 있다.

(4) 탄성지반내에서의 지하굴착

유효응력개념에 근거를 둔 탄성지반의 탄성 매트릭스 \mathbf{C}_{soil} 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{\text{soil}} &= \mathbf{C}_{\text{elas}} = \frac{\partial \sigma_{n+1}}{\partial \varepsilon_{n+1}} = \mathbf{K}(\mathbf{1} \otimes \mathbf{1}) \\ &\quad + 2\mu(\mathbf{I} - \frac{1}{3} \mathbf{1} \otimes \mathbf{1}) \end{aligned} \quad (18)$$

이때 Jacobian 매트릭스는 다음과 같이 산정되며,

$$F'_{INT} = K = \int_{\Omega_{n+1}} B^T_{n+1} (C_{elas} + C_{water}) B_{n+1} d\Omega \quad (19)$$

K 매트릭스는 주어진 지반내에서 상수값으로 나타나므로 반복과정이 필요없게 된다. 따라서 탄성지반의 경우에는 식(9)가 다음과 같이 표현된다.

$$d_{n+1} = d_n + K^{-1} [(F_{EXT})_{n+1} - F_{INT}(d_n)] \quad (20)$$

또한 탄성지반의 경우에는 중첩법을 적용하여 변위벡터 d_{n+1} 을 초기상태의 변위 d_0 혹은 초기상태의 응력 σ_0 로부터 직접 구할 수 있다.

$$d_{n+1} = K^{-1} [(F_{EXT})_{n+1} - F_{INT}(\sigma_0)] \quad (21)$$

(5) 탄소성 지반내에서의 지하굴착

탄소성 지반의 경우에는 응력과 변형률의 관계가 다음과 같이 중분의 형태로 표현된다.

$$\dot{\sigma} = C^{\sigma} \dot{\epsilon} \quad (22)$$

이와 같은 경우에는 각 단계마다의 응력을 얻기 위하여 적분이 필요하게 되며 일반적으로 수치적분 방법이 이용되고 있다.

주어진 항복조건에 대응하는 수치적분 방법을 통하여 얻어지는 응력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma_{n+1}^k = \sigma_n + \delta^k (\epsilon_{n+1}^k, \epsilon_n) \quad (23)$$

따라서 유효응력에 바탕을 둔 지반재료의 탄소성 매트릭스 $(C_{n+1}^k)_{soil}$ 은 다음 식에 의해 구해질 수 있다.

$$(C_{n+1}^k)_{soil} = \frac{\partial \sigma_{n+1}^k}{\partial \epsilon_{n+1}^k} = \frac{\partial \delta^k (\epsilon_{n+1}, \epsilon_n)}{\partial \epsilon_{n+1}^k} \quad (24)$$

Simo와 Taylor⁷⁾는 효율적인 방법으로 탄소성 매트릭스를 구하는 알고리즘을 제안하였으며 Borja와 Lee⁸⁾ 및 Lee 등⁹⁾은 이와같은 알고리즘을 여러 탄소성 모델에 적용하였다.

3.4.3 지반모델 및 모델정수값의 추정

지반재료의 응력-변형관계를 표현하기 위

하여 수많은 연구들이 행해져 왔으며 이에 따라 많은 모델들이 제안되어 왔다. 이들에 대하여는 '흙의 구성식 해설' 강좌에서 이미 다루어진 바 있다. 본 강좌에서는 이러한 여러 모델 중 실제 대상으로 삼고 있는 현장지반에 대하여 어느 모델을 선택하여 사용할 것인가 하는데 관점을 둔다. 일반적으로 지반재료들은 비선형 응력-변형관계를 지니고 있으며 초기응력상태 및 응력경로 등에 따라 그 거동이 상이하게 발생한다. 뿐만 아니라 역학적으로 규명되지 못한 불확실한 요인들이 존재하기 때문에 구성관계를 정확하게 예측하는 것은 매우 어려운 문제이다. 이제까지 제안된 여러 모델들의 특성을 감안하여 지반공학적인 의미를 가지는 구성모델을 규정지을 수 있는 기준을 다음과 같이 고려하여 보았다.¹⁰⁾

- ① 다양한 초기응력상태 및 응력경로에 대하여 응력-변형관계가 실제와 근사하게 표현될 수 있어야 한다. 이러한 모델들은 '유연성'이 확보되었다고 간주할 수 있다.
- ② 실용적으로 사용될 수 있는 구성모델은 모델계수들이 물리적인 의미를 내포하고 있어야 하고 실험을 통한 결정과정이 간편하며 적은 수의 계수들을 사용하여야 한다. 이러한 안정된 계수들을 사용하면 '안정성'이 있는 모델이라고 간주할 수 있다.

따라서 기존에 제안된 여러모델중 실용적으로 유용한 모델을 채택하고자 할 때 이러한 유연성 및 안정성을 고려하여야 할 뿐 아니라 실제지반에서 지반조사 등을 통하여 구할 수 있는 모델 계수값들을 고려하여 선정되어야 한다.

3.5 실제 적용상의 문제

본 절에서는 위와 같이 제안되어진 여러 수치해석 모델들을 실제지반에 적용하고자 할 때 고려하여야 할 여러 문제들에 관해 기술하고자

한다. 간편법을 이용하는 경우에는 앞절에서 이미 기술하였으므로 본 절에서는 유한요소법을 이용하는 컴퓨터 소프트웨어를 실제 굴착지반에 적용하고자 할 때 이와 관련된 절차를 고려하여 각 절차와 관련된 문제점들을 살펴보고자 한다."

먼저 유한요소법을 이용하는 경우에는 대상 지반이나 구조물을 임의의 요소들로 분할하는 과정이 첫번째 행하여야 할 단계이다. 이 때 야기되는 문제는 대상지반이나 관련 구조물들의 거동을 적절히 표현할 수 있는 요소의 선택이다. 일반적으로 지반의 경우에는 탄소성 연속체 요소가 주로 사용되며 벽체와 같은 구조물의 요소는 보요소나 연속체요소를 사용하여 모델된다. 또한 버팀대나 앵커와 같은 지지 구조물은 주로 트러스요소로 모델되며 스프링요소를 이용하여 모델되기도 한다. 이와 같이 여러 적절한 요소들을 사용하여 흙막이 구조물과 같은 대상 지반구조물이 해석상 사용되기 위한 세분화된 요소들로 이루어진 매쉬를 구성하게 된다.

실제 벽체와 지지 구조물들이 설치되는 과정을 굴착단계에 따라 시뮬레이션하는 방법으로는 지반요소들을 해당 구조물들의 요소로 각 굴착과정과 구조물 설치과정에 따라 대처하는 방법이 이용될 수 있다. 이와같은 방법은 지지 구조물이나 벽체의 설치로 야기되는 주변 지반의 변화를 전혀 고려하지 않는다는 가정하에 이루어질 수 있다.

또한 이러한 구조물들이 지반내에 설치된 경우에는 지반-구조물간의 상호작용이 전체 지반구조물의 거동에 큰 영향을 미치는 경우가 있다. 따라서 이러한 지반과 구조물사이의 거동을 모델하기 위하여 Joint 요소를 이용하거나 Contact 요소¹²⁾를 이용하는 경우가 있다.

뿐만 아니라 실제 지반에는 항상 지하수가 존재하며 지하굴착시 이러한 지하수의 유동이 지반-구조물의 거동에 영향을 미치게 된다. 이제까지는 이러한 지하수의 유동을 고려하지 않았으며 지하굴착시 벽체배변의 지하수가 완

전 배수된 상태나 차수된 상태의 거동을 모델할 수 있는 방법에 관하여 기술하였다. 그러나 최근에는 지하굴착으로 인하여 유발되는 steady-state 상태의 지하수 흐름을 고려하여 지하굴착 과정과 함께 시뮬레이션할 수 있는 수치해석 방법이 제안되었다.¹³⁾

참고문헌

1. Kim, Hak-Moon, "The Theoretical and Site Behavior of a Braced Diaphragm Wall-A Comparison", First Korea-Japan Joint Geotechnical Seminar, Seoul, Korea, pp. 111-127, 1990.
2. Bowles, Joseph E., Foundation Analysis and Design, 4th Edition, McGraw-Hill, P1004, 1988.
3. 대우엔지니어링 기술연구소, "도심지 굴착공사를 위한 지하 가설구조물의 설계 및 시공연구", 연구보고서, GWERI-CE-9, 1988.
4. Ghaboussi, J. and Pecknold, D.A., "Incremental Finite Element Analysis of Geometrically Altered Structures", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 20, pp.2051-2064, 1984.
5. Brown, P.T. and Booker, J.K., "Finite Element Analysis of Excavations", School of Civil and Mining Engineering Research Report, No. 532, The University of Sydney, 1986.
6. Borja, R.I., Lee, S.R., and Seed, R.B., "Numerical Simulation of Excavation in Elastoplastic Soils", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 13, pp.231-249, 1989.
7. Simo, J.C. and Taylor, R.L., "Consistent Tangent Operators for Rate-Independent Elastoplasticity", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 48, pp.101-118, 1985.
8. Borja, R.I., and Lee, S.R., "CAM-CLAY Plasticity, Part I: Implicit Integration of Elastoplastic Constitutive Relations", Computer Methods in Applied Mechanics and En-

- gineering, Vol. 78, pp.49-72, 1990.
9. Lee, S.R., Borja, R.I., and Seed, R.B., "Nonlinear Elastoplastic Finite Element Analysis of Braced Excavations in Clay", Research Report No. SU/GT/89-02, Stanford University, 1989.
 10. 오세봉, "흙의 수치해석 모델 개발 및 회귀사상 알고리즘에 의한 유한요소해석", 석사학위 논문, 한국과학기술원, pp.67, 1991.
 11. Lee, S.R., "Unification of the Design and Construction of Deep Excavation", 1st Korea-Japan Joint Geotechnical Seminar on Excavation & Tunnelling in Urban Areas, Seoul, KOREA, pp.163-175, 1990.
 12. 이승래, "연약지반의 성질이 지하굴착시 구조물 및 지반의 거동에 미치는 영향에 관한 연구", 한국 과학재단 기본연구 최종연구 보고서, KAIST, 1991.
 13. Borja, Ronaldo I, "Free Boundary, Fluid Flow, and Seepage Forces in Excavation", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 1, pp.125-146, 1992.
 14. 김학문, "도심지 지하굴착에 적용된 Top-Down 공법의 수치해석과 실측비교", 지반공학에서의 컴퓨터 활용, 1991, 추계학술발표 논문집, 한국지반공학회, pp.318-319, 1991