

지하수의 천이흐름을 고려한 지하구조계의 유한요소해석 Finite Element Analysis of Underground Structural Systems Considering Transient Flow

김 문겸* 이 종우** 박 성우***
Kim, Moon-Kyum Rhee, Jong-Woo Park Sung-Woo

ABSTRACT

In this paper, behaviour of underground structural systems due to excavation and change of groundwater level is analyzed using finite elements. Equilibrium equations based on the effective pressure theory and transient flow equations considering the groundwater level are derived. Integration equations are derived using Galerkin's approximation and time dependent analysis is employed to compute groundwater level change and pore pressures. This computed pore pressures are employed in equilibrium equations and then finally displacements and stresses are computed.

The developed program is applied to analyze the behaviour of ground excavation below the groundwater level. The program is also applied to multi-step excavation at the same model. The results show that the displacements of the ground surface are much influenced by the change of the groundwater level. Therefore, it is concluded that the change of the groundwater level should be considered in order to analyze the behaviour of the underground structural systems accurately

1. 서 론

지하원유저장고 등의 지하구조물에서 굴착으로 인한 지하수위의 저하는 외부로의 원유유출 가능성을 크게 하여 터널의 사용성에 문제를 발생시킨다. 또 일반적인 지하구조계의 굴착에서도 지하수위가 내려가면 유효응력이 증가하게 되어 지표면의 변위가 증가하게 된다. 따라서 지하수위의 변화를 예측하여 이를 설계에 반영하는 것은 지하구조계의 안정성 및 사용성 확보에 필수적인 것이라고 볼 수 있다.

지반굴착 해석모형에 대하여 여러가지 각도에서의 연구가 수행되어 왔지만, 대부분 전응력이론을 기초로 하였으며 지반에 포함된 유체의 영향은 무시하거나 배제되어 왔다. 또한 유체의 영향을 고려하여 시간중속적 배수거동을 해석하는 모형이 일부 개발되었지만 지하수위의 변화를 고려하지 않은 경우에는 유체의 흐름에 의한 역학적 현상을 정확히 반영하지 못하였다. 그러므로 지하구조물의 설계시 고체의 변형 뿐만 아니라 굴착으로 인한 지하수위의 변화를 고려하여야만 구조계의 거동을 정확히 해석하여 경제적이고 안전한 설계를 할 수 있다. 본 연구에서는 시간중속적인 지하수위 변화에 따른 공극수압의 영향을 예측하기 위하여 천이흐름 방정식 (transient flow equation) 과 유효응력을 고려한 평형방정식을 구성한다. 이렇게 구성된 두개의 기본방정식은 Galerkin 법으로 이산화하고, 시간중속천이흐름 방정식에 대한 시간적분을 수행하여 지하수위가 변하는 굴착영역에 대한 효율적인 해석방법을 개발하였다.

2. 지하수를 포함한 지하구조계의 모형화

유체를 포함하고 있는 연속체 문제의 지배방정식은 미지변수로서 해석 대상구조물의 변위뿐만 아니라 유체에 의한 공극수압의 항을 포함하게 되므로 전응력을 공극수압과 유효응력으로 나누어 고려한 평형방정식의 형태로 표현되어진다. 또한 굴착에 의한 경계조건을 만족시키는 공극수압을 구하기 위해서는 천이흐름방정식을 이용한다.

* 연세대학교 토목공학과 교수
** 연세대학교 토목공학과 박사과정
*** 연세대학교 토목공학과 석사졸업

대상 지반 영역에서 고체입자의 변위와 유체의 공극수압이 조합된 기본방정식으로부터 적분방정식을 유도하기 위해 가중잔차법을 사용한다. 또한 대상지반의 유한영역을 Galerkin 근사법에 의해 이산화하고, 이산화 영역에 대해 기지의 경계조건을 도입한다.

미지변수인 공극수압은 지하수의 천이흐름방정식을 통해 얻을 수 있으며 구해진 공극수압으로부터 평형방정식의 미지변수인 변위를 구한다. 여기서 지하수의 천이흐름방정식은 시간 종속적이므로 적절한 보간법에 의한 시각력 해석을 필요로 하며, 해석을 통해서 시간 종속적 혼합 유한요소 방정식을 얻을 수 있다.

2.1 지하수의 천이흐름방정식

정상흐름상태에서 질량보존의 법칙에 따르면, 완전 포화된 미소육면체에서 각 방향으로의 총 유입량과 총유출량은 같다. 그러므로 각 방향에 대한 유량변화의 총합은 0 이 된다.

$$-\frac{\partial}{\partial x} v_x - \frac{\partial}{\partial y} v_y - \frac{\partial}{\partial z} v_z = 0 \quad (1)$$

여기서 v_x, v_y, v_z 는 각각 x, y, z 방향의 유속이다.

미소육면체의 경계에서 유입 또는 유출 등의 특정한 흐름을 고려하게 되면 식 (1) 에 유량에 대한 항이 추가되고 Darcy의 법칙을 적용하여 식 (2) 과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + q = 0 \quad (2)$$

여기서 h 는 총수두이고 k_x, k_y, k_z 는 각각 x, y, z 방향에 대한 투수계수이며 q 는 특정 유량이다.

천이흐름에서는, 유체의 총유입과 총유출이 시간에 따라 계속 바뀌므로 미소육면체내 총흐름량의 변화가 0 이 되지 않는다. 따라서 식 (2) 의 우변에 시간에 따른 항을 추가할 수 있다

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + q = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

여기서 S_y 는 저류(貯溜)계수 (specific yield) 이다. 이는 유체의 단위중량과 지하매체의 공극률의 곱으로 표현되는 무차원량으로 흐름속도에 영향을 준다. 보통 물의 경우 단위중량이 1 이므로 저류계수는 공극률과 같은 값을 가진다.^{[1][2]}

식 (3) 의 총수두 h 를 각 요소에 대하여 근사화하면 다음과 같은 가중잔차식(weighted residual equation)을 구성할 수 있다.^[2]

$$\int_{\Omega^{(e)}} W_i^{(e)} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x^{(e)} \frac{\partial \hat{h}^{(e)}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y^{(e)} \frac{\partial \hat{h}^{(e)}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z^{(e)} \frac{\partial \hat{h}^{(e)}}{\partial z} \right) + q^{(e)} - S_y^{(e)} \frac{\partial \hat{h}^{(e)}}{\partial t} \right] d\Omega^{(e)} = 0 \quad (4)$$

여기서 $W_i^{(e)}$ 는 요소 e 의 절점 i 에 대한 가중함수, $\hat{h}^{(e)}$ 는 요소 e 안에서 총수두에 대한 근사해, $\Omega^{(e)}$ 는 요소 e 의 영역이고, $k_x^{(e)}, k_y^{(e)}, k_z^{(e)}$ 는 요소 e 에 대한 x, y, z 방향의 투수계수, $q^{(e)}$ 는 요소 e 에서의 유량을 의미한다.

식 (4)에 Galerkin method 를 적용하면 요소 e 내의 절점 i 에서 가중함수와 보간함수는 같다 ($W_i^{(e)} = N_i^{(e)}$). 또한, 한 요소내에서 투수계수 k_x, k_y, k_z 는 각각 x, y, z 방향에 대하여 일정한 값을 갖는다면 식 (4) 는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\int_{\Omega^{(e)}} N_i^{(e)} \left[k_x^{(e)} \frac{\partial^2 \hat{h}^{(e)}}{\partial x^2} + k_y^{(e)} \frac{\partial^2 \hat{h}^{(e)}}{\partial y^2} + k_z^{(e)} \frac{\partial^2 \hat{h}^{(e)}}{\partial z^2} + q^{(e)} - S_y^{(e)} \frac{\partial \hat{h}^{(e)}}{\partial t} \right] d\Omega^{(e)} = 0 \quad (5)$$

식 (5) 를 부분적분하고 인위적인 유체의 흐름이 없다면 경계항은 0 이 되며 2차원 문제로 제한한다면 다음식과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} & - \int_{\Omega^{(e)}} N_i^{(e)} \left[k_x^{(e)} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial x} \frac{\partial \hat{h}^{(e)}}{\partial x} + k_y^{(e)} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial y} \frac{\partial \hat{h}^{(e)}}{\partial y} \right] d\Omega^{(e)} \\ & + \int_{\Omega^{(e)}} N_i^{(e)} q^{(e)} d\Omega^{(e)} - \int_{\Omega^{(e)}} N_i^{(e)} S_y^{(e)} \frac{\partial \hat{h}^{(e)}}{\partial t} d\Omega^{(e)} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

따라서 위의 식을 간단한 행렬식으로 표현하면 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$[C]\{\dot{h}\} + [G]\{h\} = \{Q\} \quad (7)$$

여기서 $[G]$ 는 유량의 전도행렬, $[C]$ 는 저류행렬, $\{Q\}$ 는 유량벡터이고 벡터 $\{\dot{h}\}$ 와 벡터 $\{h\}$ 는 각각 다음식과 같다.

$$\{h\} = \begin{Bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_n \end{Bmatrix}, \quad \{\dot{h}\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial t} \\ \vdots \\ \frac{\partial h_n}{\partial t} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

식 (7)로부터 시간증분에 따른 반복계산을 행하여 경과시간에서의 총수두를 구할 수 있다.

그림 1은 자유수면 이하의 영역이 굴착되었을 때 굴착으로 인한 수두의 경계조건을 나타낸 것이다. 먼저 각 측면의 경계조건은 외부로부터 일정한 수두를 유지하도록 물이 계속 공급된다고 할 때, 각각 다음과 같은 식을 만족한다.

$$h = H_1 \quad (\text{㉞}-\text{㉟} \text{ 면}) \quad (9a)$$

$$h = H_2 \quad (\text{㉠}-\text{㉡} \text{ 면}) \quad (9b)$$

여기서 H_1 과 H_2 는 각각 좌우측 경계면에서의 총수두이다.

굴착면에서는 공동 내부가 공기중에 노출되어 있으므로 공동벽면에는 대기압이 작용한다. 따라서 공동벽면의 경계조건은 다음의 식과 같이 그 지점에서의 위치수두 z 로 정해진다.

$$h = z \quad (\text{㉢} \text{ 면}) \quad (10)$$

하부면 이하에서의 흐름은 없다고 가정하면 하부면에서의 경계조건은 수직방향 성분의 속도벡터가 없는 것이다. 따라서

$$\frac{\partial h}{\partial n} = 0 \quad (\text{㉣}-\text{㉤} \text{ 면}) \quad (11)$$

이다. 자유수면의 경우 수면과 수직인 방향으로의 흐름이 없고, 수면에서의 공극수압은 0이므로 그 면에서의 전체수두는 위치수두가 된다. 그러므로 식 (12)와 같은 두 가지의 경계조건을 모두 만족 시켜야 한다.

$$h = z, \quad \frac{\partial h}{\partial n} = 0 \quad (\text{㉞}-\text{㉟} \text{ 면}) \quad (12)$$

식 (12)에 나타낸 경계조건을 만족시키기 위해서는 식 (7)에 대한 반복계산이 필요하다. 본 연구에서는 지하수면 위의 요소를 변화 혹은 제거하는 기존 방법의 단점을 보완하기 위해서 Bathe^[3] 등의 요소망을 재구성하지 않고 자유수면을 결정하는 방법을 이용하였다.

2.2 평형방정식

연속체내의 미소육면체에 작용하는 응력과 물체력으로부터 다음과 같은 평형방정식을 구성할 수 있다.

$$\sigma_{ij,j} + b_i = 0 \quad (13)$$

여기서 σ_{ij} 는 응력텐서 성분이고, b_i 는 물체력 성분이다.

지하수를 포함하는 다공매체의 경우 전응력은 유효응력과 공극수압의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma'_{ij,j} + \delta_{ij}\pi_{,j} + b_i = 0 \quad (14)$$

여기서 σ'_{ij} 는 유효응력텐서성분, π 는 공극수압성분을 나타내고 δ_{ij} 는 Kronecker delta이다.

평형방정식 (14)로부터 가중잔차식을 구성하면 다음과 같다.

$$\int_{\Omega} W_i (\sigma_{\ddot{u},j} + \delta_{\ddot{u}} \pi_{,j} + b_i) d\Omega = 0 \quad (15)$$

여기서 W_i 는 i 방향으로의 가상변위를 나타내는 가중함수다.

다공매체 영역 Ω 의 전체 경계 Γ 를 기하학적 경계 Γ_1 과 역학적 경계 Γ_2 로 구분할 수 있다. 기하학적 경계 Γ_1 에서 변위벡터 성분은 기지의 표면력 벡터성분과 같고, 역학적 경계 Γ_2 에서 표면력벡터 성분은 기지의 표면력벡터 성분과 같다. 위의 식 (15) 를 전개하여 부분적분하고 발산정리를 적용하고 경계조건을 적용하면 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{\Omega} W_{i,j} c_{ijkl} u_{k,l} d\Omega + \int_{\Omega} W_{i,j} \pi d\Omega = \int_{\Omega} W_i b_i d\Omega + \int_{\Gamma_2} W_i \bar{t}_i d\Gamma \quad (16)$$

여기서 c_{ijkl} 은 탄성계수 성분, $u_{k,l}$ 은 변위의 텐서성분이고 \bar{t}_i 는 경계에서의 기지의 표면력 벡터 성분이다.

식 (16) 의 변위 u 와 공극수압 π 를 미지의 항과 경계조건을 만족하는 항의 합으로 표현하면 다음과 같은 행렬형태로 나타낼 수 있다.

$$[K] \{ \bar{U} \} + [L] \{ \bar{\Pi} \} = \{ F \} \quad (17)$$

여기서 $[K]$ 는 강성행렬, $[L]$ 은 조합행렬 $\{ \bar{U} \}$ 는 변위벡터, $\{ \bar{\Pi} \}$ 는 공극수압벡터, $\{ F \}$ 는 하중벡터이다.

2.3 해석 프로그램의 구성

식 (7) 의 해를 구하기 위해서 유한차분법을 이용하여 시간 증분형태로 표현하면 다음과 같다.

$$([C] + \omega \Delta t [G]) \{ h \}_{t+\Delta t} = ([C] - (1-\omega) \Delta t [G]) \{ h \}_t + \Delta t ((1-\omega) \{ Q \}_t + \omega \{ Q \}_{t+\Delta t}) \quad (18)$$

여기서 ω 는 $0 \leq \omega \leq 1$ 범위의 값으로, 본 연구에서는 $\omega = 1/2$ 의 central difference (Crank- Nicholson) 기법을 이용하였고, Δt 는 시간의 증분을 의미한다. h 는 총수두를 나타내므로 공극수압 π 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\pi = \gamma_w (h - h_{EL}) \quad (19)$$

여기서 h_{EL} 은 위치수두이고, π 는 공극수압을 나타낸다. 본 연구에서는 먼저 천이흐름방정식에서의 시간해석에 의한 총수두를 구하고, 구해진 총수두를 식 (19) 에 대입하여 공극수압을 구한 후, 이 값을 다시 평형방정식에 대입하여 최종적으로 변위와 응력을 구한다.

3. 굴착해석 및 결과분석

3.1 천이흐름 프로그램의 검증

천이흐름 프로그램의 검증을 위해서 그림 2 와 같이 한번의 길이가 6m 인 정사각형 흙댐을 모형화 하였다. 초기상태는 좌측 우측 모두 6m 의 수두를 가지고, 이와 같은 초기상태에서 우측저수지의 수위를 1.2m 로 강하시켰을 때 이에 따른 흙댐내의 천이흐름을 해석하였다. 투수계수는 등방성이라고 가정하여 0.12m/day 로 하였고 저유계수는 0.15 로 하였다. 각 요소당 4개의 절점을 구성하였고, 20×20 의 요소수로 요소망을 구성하였다.

경계조건으로 양 측면에 각각 6m 와 1.2m 의 수두를 적용하였고 흙댐의 하부는 불투수층으로 가정하였다. 우측저수지의 수두가 하강하면서 그림 2 의 S_1 과 같은 침투면이 발생한다. 따라서 S_1 지점은 식 (20) 과 같은 경계조건을 갖는다.

$$h = z \quad (20)$$

여기서 z 는 S_1 면의 각 점에서의 위치수두이다.

본 프로그램의 해석결과를 Redshaw^[4] 와 Cividini^[5] 의 지하수위 변화에 대한 해석결과와 비교하여 각각의 시간에 따른 수위의 변화를 그림 3 에 나타내었다. 그림 3(a),(b),(c) 는 우측저수지

의 지하수위가 강하한 후 각각 12일, 26일, 52일이 지났을 때의 결과이고, 그림 3(d)는 정상흐름 상태의 지하수면을 도시한 것이다. Redshaw는 지하수면을 결정하기 위해 유한차분법으로 지하수면만을 예측하는 식을 구성하였으므로 지하수면 이하의 각 절점의 수두의 계산결과에는 많은 오차를 포함하는 단점을 가지고 있다. 또한 Cividini는 유한요소법을 이용하여 절점내의 유량에 따라 지하수위를 임의로 옮기는 근사법을 이용하여 지하수면을 결정하였다. 그러나 그림 3(c),(d)에서 볼 수 있듯이 시간이 경과함에 따라 본 연구결과와 일치함을 알 수 있었다.

3.2 굴착해석의 검증

천이흐름과 굴착 프로그램의 검증을 토대로 2차원 굴착을 수행하였다. 굴착모형은 그림 4와 같이 폭이 60m, 높이가 50m이고 굴착은 좌측상부에 폭 25m, 높이 20m의 크기로서 Small^[2]의 모형과 동일하게 구성하였다. 경계조건으로 수두의 경우 하부층(㉔-㉕면)은 불투수층이고 우측(㉑-㉒면)의 수두는 50m로 가정하였으며 굴착이 이루어진 후에는 굴착면(㉑-㉒-㉓면)을 따라 공극수압이 0이 된다고 가정하였다. 변형에 대한 경계조건으로는 하부면(㉔-㉕면)과 측면(㉑-㉒-㉓면, ㉑-㉒면)의 변위를 구속하였다.

요소망은 그림 5와 같이 400개의 4절점 4변형 요소로 구성하였다. 해석을 위한 물성치로서 Small의 경우와 같게 탄성계수 1000t/m², 포아송비는 0.3, 흙의 단위중량은 2.0t/m³, x, y방향의 투수계수는 0.1m/day 정지토압계수는 0.5, 저류계수는 0.2로 하였다.

그림 6에서 굴착 측면의 굴착 후 1000일 경과후 해석변위는 Small의 해석과 거의 일치함을 알 수 있다. 굴착 측면의 상부는 시간이 지남에 따라 굴착 직후에 비하여 변위가 증가함을 보인다. 이는 지표면 변위가 큰 폭으로 하강함에 따른 영향인 것으로 판단된다. 그림 7에서 굴착직후 굴착면 근처의 지표변위는 오히려 상향의 변위가 발생함을 알 수 있다. 이는 굴착저면(그림 4의 ㉑-㉒면)에 작용하는 상향의 표면력의 영향을 받았기 때문으로 판단된다. 따라서 굴착 1000일 후의 변위는 굴착면과 가까운 쪽이 먼쪽보다 상대적으로 변위가 작게 발생함을 알 수 있다. Small의 해석 변위와 약간의 차이가 발생하는 이유도 이러한 굴착저면 표면력영향의 차이 때문으로 사료된다.

3.3 굴착 단계별 해석

굴착 문제를 해석함에 있어서 실제 시공상태를 고려한 해석이 되기 위해서는 굴착 단계별 해석이 필요하다. 따라서 그림 5와 동일한 모형에 대하여 굴착 단계별 해석을 실시하였다. 굴착단계는 그림 8과 같다. 첫번째 단계는 10m 깊이의 굴착을 행하였고, 100일이 지난 후에 6m 깊이의 두번째 굴착을 행하였다. 첫번째 굴착 후 200일이 지나면 4m 깊이의 세번째 굴착을 행하여 굴착이 모두 완료가 되면 그림 4와 동일한 굴착 모형이 되도록 하였다.

그림 9와 그림 10은 각각 그림 5에 표시한 B점과 C점에서의 경과시간에 따른 변위를 나타낸 것이다. 단계별 굴착을 고려하여 해석하였을 때와 고려하지 않았을 때의 해석을 비교하여 도시하였다.

B점의 경우에 있어서 지표면은 굴착면과 직접 접하지 않으므로 굴착으로 인한 변위는 굴착측면(C점)의 변위와 비교할 때 상대적으로 작은 값을 가진다. 또한 B점의 경우 각 단계마다 공극수압의 변화에 따라 큰 폭의 변위 변화가 발생하였다. 반면 C점의 경우 단계별 굴착이 이루어질 때마다 큰 폭의 변위 변화가 발생하였지만 지하수위 변화의 영향은 상대적으로 작음을 알 수 있다. 이는 굴착 측면에서는 공극수압의 영향이 비교적 크지 않다는 것을 의미한다.

3.4 터널 해석

굴착문제의 해석을 터널해석에 적용하였다. 해석대상 지역은 탄성계수 1000t/m, 포아송비 0.3, 흙의 단위중량 2.0 t/m³, x와 y방향의 투수계수 0.1m/day, 정지토압계수 0.5, 저류계수 0.2의 물성을 가진다. 그림 11에서 볼 수 있듯이 지표에서 50m 깊이에 반지름은 5m의 터널을 굴착하였다. 최초의 지하수위는 지표면에 위치하며 해석 대상이 좌우대칭이므로 반단면 해석을 수행하였다. 터널에서 우측으로 80m 떨어진 곳에서는 지하수의 유입이 계속되어 일정한 수위를 유지한다고 가정하여 수두의 경계조건을 주었고, 터널의 굴착이 이루어지면 굴착면의 총수두는 위치수두가 되도록 경계조건을 구성하였다. 총 333개의 4절점 요소로 구성된 모형을 구성하였다.

그림 12(a)는 굴착 직후부터 1000일이 경과할 때까지의 터널 상단과 하단의 상대 수직변위를 도시한 것이다. 굴착 후 경과시간에 따른 터널 측면의 변위와 지표면의 변위는 각각 그림 13와 그림 14에 나타내었다. 터널 측면의 변위는 터널 상하단의 변위와 마찬가지로 변위에 대한 공극수압의 영향이 크지 않다. 반면 지표의 변위는 굴착 직후보다 시간이 지남에 따라 크게 발생

하였음을 알 수 있다. 이와 같은 지하수위의 변화에 따른 지하구조의 영향을 판단하기 위해 굴착 직후와 굴착 1000일 후의 변위를 비교하여 표 1에 나타내었다. 그 결과 터널 내부의 변위보다는 지표면의 변위가 지하수의 영향을 더 많이 받음을 알 수 있었고, 터널 측면은 시간이 지남에 따라 변위가 감소하지만 터널 상하단의 상대변위는 증가함을 볼 수 있었다.

4. 결론

- (1) 굴착으로 인하여 발생하는 천이흐름을 고려한 지하구조계의 유한요소 프로그램을 개발하여 천이흐름에서 자유수면의 경계조건을 만족시키기 위해 요소망을 변화시키거나 반복적인 계산을 수행하지 않고도 간단하게 수위를 예측할 수 있음을 밝혔다.
- (2) 지하수위의 변화를 고려한 해석결과는 지하수위의 변화를 고려하지 않거나 또는 전응력 개념으로 해석한 결과와 비교하여 많은 해석수치의 차이를 보이므로 굴착으로 인한 지표면 저하의 정확한 해석을 위해서는 설계시 지하수의 영향을 고려해야 한다고 사료된다.
- (3) 굴착단계별 해석을 실시한 결과 굴착 측면의 경우 굴착으로 인한 변위가 지하수위의 변화에 의한 변위보다 상대적으로 크고, 지표면의 경우 지하수위의 변화에 의한 변위가 굴착의 경우에 비해 상대적으로 크다는 것을 알 수 있었다.
- (4) 터널의 해석시 지하수위가 내려감에 따라 터널 측면의 수평변위는 감소하고 터널 상·하단의 상대수직변위는 증가함을 볼 수 있었으며, 지표면의 변위는 터널 내의 변위보다 상대적으로 지하수위의 영향을 크게 받는 것을 알 수 있었다.

표 1 지하수가 변위에 미치는 영향

	굴착직후 변위 (cm)	굴착 1000일 후 변위(cm)	(굴착 1000일 후의 변위) (굴착 직후의 변위)
터널 상하단의 상대변위	-13.434	-14.723	1.096
터널 측면의 변위	-3.821	-3.213	0.841
지표면의 변위	-2.306	-16.419	7.120

4. 참고문헌

1. Istok, J., *Groundwater Modelling by the Finite Element Method*, American Geophysical Union, Washinton D.C., 1989.
2. Hsi, J.P. and Small, J.C., "Simulation of Excavation in a Poro-Elastic Material," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.16, 1992, pp.25-43.
3. Bathe, K.J. and Khoshgoftaar, M.R., "Finite Element Free Surface Seepage Analysis without Mesh Iteration," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.3, 1979, pp.13-22.
4. Redshaw, S.C. and Rushton, K.R., *Seepage and Groundwater Flow*, John Wiley & Sons, University of Birmingham, 1979.
5. Cividini, A. and Gioda, G., "An Approximate Finite Element Analysis of Seepage with a Free Surface," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.8, 1984, pp.549-566.
6. 구정희, 다공매체의 변형과 유체의 흐름을 고려한 지하구조계의 유한요소해석, 박사학위 논문, 연세대학교 본대학원 토목공학과, 1993.
7. Desai, C.S., "Finite Element Residual Schemes for Unconfined Flow," *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, Vol.10, 1976, pp.1415-1418.

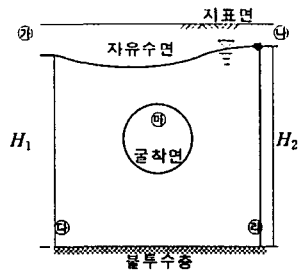


그림 1 지하수 흐름의 경계조건

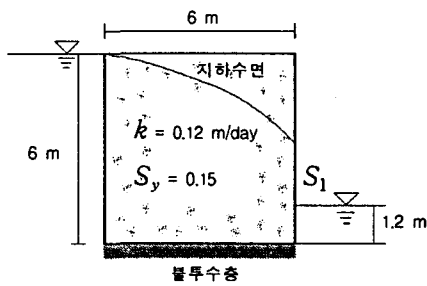


그림 2 천이흐름의 검증모형

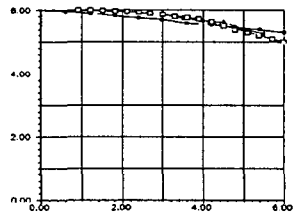


그림 3 (a) 흙댐의 천이흐름(12일 후 지하수위)

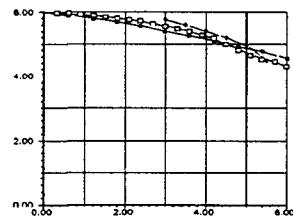


그림 3 (b) 흙댐의 천이흐름(26일 후 지하수위)

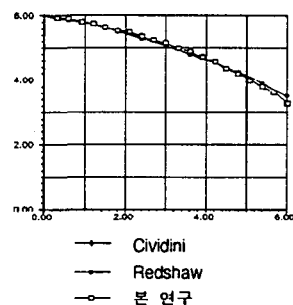


그림 3 (c) 흙댐의 천이흐름(52일 후 지하수위)

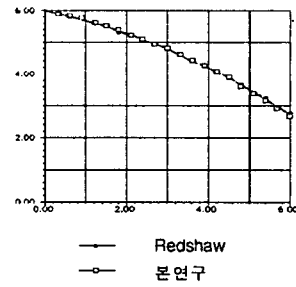


그림 3 (d) 흙댐의 천이흐름(정상흐름)

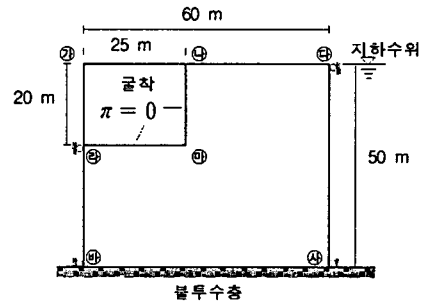


그림 4 2차원 굴착모형과 경계조건

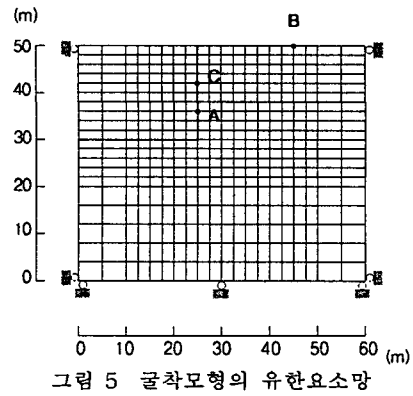


그림 5 굴착모형의 유한요소망

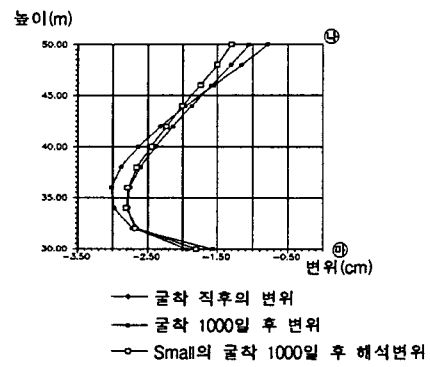


그림 6 굴착측면의 수평변위도

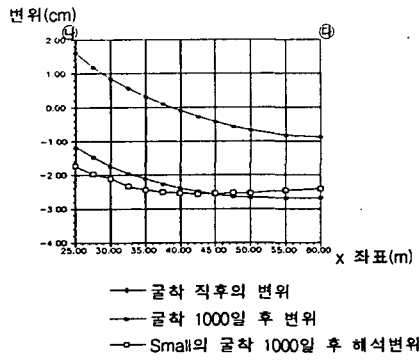


그림 7 지표면의 수직변위도

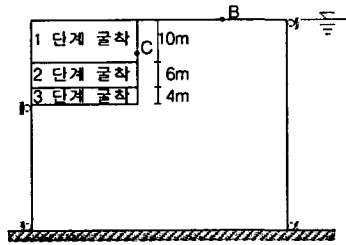


그림 8 단계별 굴착모형

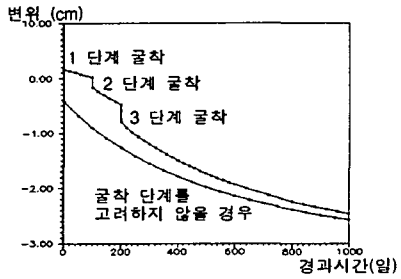


그림 9 B점에서의 굴착단계에 따른 변위

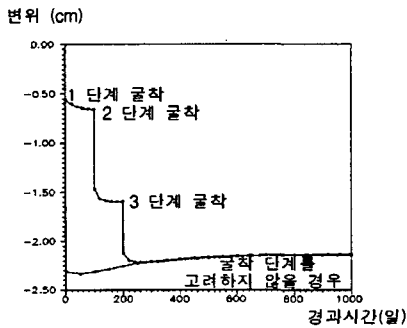


그림 10 측면(C점)에서 굴착단계에 따른 변위

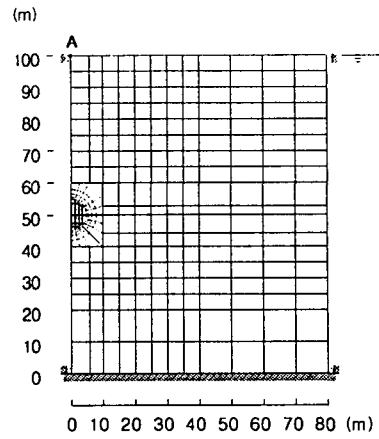


그림 11 터널 굴착의 모델링

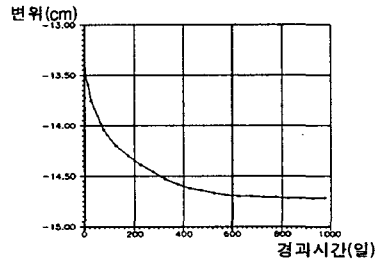


그림 12 터널 상하단의 상대수직변위

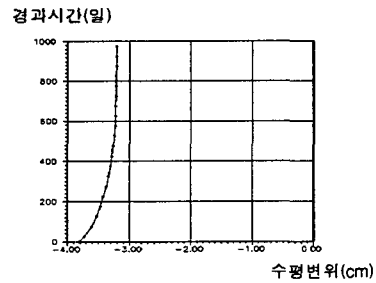


그림 13 터널 측면의 수평변위

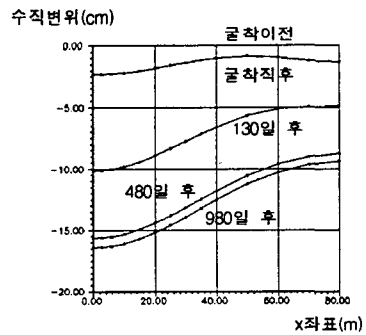


그림 14 지표면의 수직변위