

ABAQUS 코드를 이용한 전체 변형률 영역의 거동에 대한 유한요소해석 Finite Element Analyses on the Behavior of Overall Strain Range using ABAQUS Code.

오세봉¹⁾, Se-Boong Oh, 전병곤²⁾, Byung-Gon Jeon, 한성수²⁾, Sung-Su Han

¹⁾ 영남대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept, of Civil Engineering, Yeungnam Univ.

²⁾ 영남대학교 토목공학과 석사 Research Assistant, Dept, of Civil Engineering, Yeungnam Univ.

개요(SYNOPSIS) : 미소변형에서 대변형에 이르는 전체 변형률 영역의 구성모델을 ABAQUS 코드에 구현하였다. 구성모델은 비등방경화규칙에 근거한 전응력 개념의 탄소성 모델로 연약 점토나 풍화토에 적용하는 것이 가능하다. 사용된 정식화 및 알고리즘은 (1) Jaumann 응력속도를 이용한 대변형도 조건 정식화 (2) 내재적인 응력적분 (3) 일관된 접선계수를 포함하고 있다. 이를 통하여 대변형 해석을 정확하고 효율적으로 수행할 수 있었다. 예제를 통하여 새로운 구성모델과 ABAQUS 코드를 이용한 대변형 해석을 수행할 수 있음을 확인하였다. 특히 전체변형률 영역의 거동을 모델하고 범용 해석 프로그램을 이용한 비선형 대변형 해석에 적용하는 것이 가능하였다.

주요어(Key words) : ABAQUS, 비등방 경화규칙, 대변형 해석, 비선형 유한요소해석, 내재적 응력적분

1. 서론

지반재료의 거동을 관찰하면, 미소변형률 영역에서 대변형률 영역의 거동이 모두 비선형적이지만 아니라 영향인자가 복잡하게 작용한다. 이러한 거동은 실제 지반공학문제에 반영되어 전체변형률 영역의 거동중 주요한 영향을 끼치는 부분이 대상문제에 따라 구분된다. 실험적인 자료 획득에 있어서는 미소변형률 영역의 거동을 측정하는 것이 까다로운 반면, 해석적인 측면에서는 대변형률 영역의 해석에 어려움을 겪는 실정이다. 본 연구는 전체변형률 영역의 거동을 획득하고 모델하는 분야에서 대변형률 해석과 관련된 부분에 속한다(오세봉 등 2000).

대변형도(finite strain) 연속체 역학의 관점에서 탄소성 구성관계는 응력속도에 따른 정식화를 하는 것이 편리하다.(이는 몇 가지 단순화와 한계를 수반한다.) 이러한 정식화 과정에서 응력속도의 객관성(objectivity)을 확보하여야 하는데, 본 연구에서는 가장 널리 사용되는 Jaumann 속도를 이용한 정식화를 수행한다.(Hughes, 1984, Lush et al., 1989) 그리고 응력속도에 근거한 구성관계를 수학적 정확도를 유지하도록 정식화하는 과정에서 내재적인 응력적분 알고리즘을 적용하였다. 반복적인 해풀이 과정에서 필요한 해의 수렴도를 확보하기 위하여 일관된 접선계수를 정식화하였다(Simo and Taylor, 1985).

이러한 수학적 정식화를 토대로 ABAQUS 코드(Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. 2001)의 사용자 서브루틴 UMAT에 GUX 모델을 구현할 수 있었다. GUX 모델은 전응력 개념에 근거한 비등방경화 탄소성 구성모델로 미소변형도에서 파괴에 이르는 전체변형률 거동을 모델할 수 있다(오세봉, 1999).

2. 대변형도 조건에 대한 탄소성 구성방정식

변형속도 텐서는 통상적으로 탄성량과 소성량으로 구분한다. (즉 $\mathbf{D} = \mathbf{D}^e + \mathbf{D}^p$), 객관성(objectivity)을 만족하는 탄소성 응력-변형률 관계는 Jaumann 응력속도를 이용하여 다음식과 같이 나타난다.(Simo and Hughes 1998)

$$\overset{\vee}{\mathbf{T}} = \mathbf{C}^e : (\mathbf{D} - \mathbf{D}^p) \quad (1)$$

이 때 대변형도(finite strain) 조건에서 필요한 통상적인 부호규약에 대하여 다음과 같이 정리한다.

$\overset{\vee}{\mathbf{T}} \equiv \dot{\mathbf{T}} - \mathbf{W}\mathbf{T} + \mathbf{T}\mathbf{W}$	Cauchy 응력 \mathbf{T} 에 대한 jaumann속도
$\dot{\mathbf{T}}$	Cauchy 응력 \mathbf{T} 의 물질도함수(material time derivative)
$\mathbf{L} \equiv \text{grad } \mathbf{v}$	속도 \mathbf{v} 의 공간구배(spatial gradient)
$\mathbf{D} \equiv \text{sym}(\mathbf{L})$	변형속도(deformation rate)텐서
$\mathbf{W} \equiv \text{skew}(\mathbf{L})$	스핀(spin)텐서

그리고 소성항 \mathbf{D}^p 는 미소변형 소성론에 근거한 유동규칙(flow rule)에 의하여 정의된다고 가정한다. 따라서 다음과 같이 Cauchy 응력에 의하여 정의할 수 있다.

$$\mathbf{D}^p = \dot{\gamma} \mathbf{N}, \quad \mathbf{N} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{T}} \quad (2)$$

한편 내부변수는 다음 식과 같은 형태로 일반화할 수 있다.

$$\dot{r} = h(r) \dot{\tilde{\epsilon}}^p \quad (3)$$

여기서 $\dot{\tilde{\epsilon}}^p \equiv \sqrt{\frac{2}{3}} \|\text{dev}(\mathbf{D}^p)\|$ 로서 삼축조건시 $\tilde{\epsilon} = \frac{2}{3}(\epsilon_a - \epsilon_r)$ 이다. 축차응력 불변수(invariant) $q = \sigma_a - \sigma_r$ 에 상응하는 변형도 불변수이다.

비대칭 스핀 텐서 $\mathbf{W} = -\mathbf{W}^T$ 에 대하여 다음 식을 만족하는 회전 $\mathbf{Q}(t)$ 를 $[t_n, t_{n+1}]$ 구간에서 정의한다.

$$\dot{\mathbf{Q}} = \mathbf{W}\mathbf{Q}, \quad \mathbf{Q}|_{t=t_n} = \mathbf{1} \quad (4)$$

이러한 \mathbf{Q} 에 의하여 변환된 대칭 2계 텐서 및 Cauchy 응력에 대한 물질 시간도함수를 이용하여 식 (1)~(3)는 다음과 같다 (Hughes, 1984),

$$\bar{\mathbf{T}} = \mathbf{C}^e : (\bar{\mathbf{D}} - \bar{\mathbf{D}}^p), \quad \bar{\mathbf{D}}^p = \dot{\gamma} \bar{\mathbf{N}}, \quad \bar{\mathbf{N}} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \bar{\mathbf{T}}}, \quad \dot{r} = h(r) \dot{\tilde{\epsilon}}^p. \quad (5)$$

3. 내재적인 응력적분

식 (5)는 증분형태의 구성관계로서 비선형 유한요소해석시 수치적분이 필요하다. n 번째 수렴한 후 $n+1$ 번째 현 시간단계내의 반복과정에서 식 (9)를 적분하면 다음과 같다.

$$\bar{\mathbf{T}}_{n+1} = \bar{\mathbf{T}}^n - \mathbf{C}^e : \int_{t_n}^{t_{n+1}} \bar{\mathbf{D}}^p dt, \quad \bar{\mathbf{T}}^n = \mathbf{T}_n + \mathbf{C}^e : \int_{t_0}^{t_n} \bar{\mathbf{D}} dt \quad (6)$$

시도응력은 비선형 유한요소해석 절차에서 수렴된 단계의 응력과 반복과정중의 변형도에 의하여 정의되는 기지의 값이다. 따라서 식 (6)에서는 소성 변형속도의 적분만이 필요하다. 후진 Euler 절차에 의거하면 다음과 같이 유도된다.

$$\bar{\mathbf{T}}_{n+1} \equiv \bar{\mathbf{T}}^n - \mathbf{C}^e : \Delta t (\bar{\mathbf{D}}^p)_{n+1} \quad (7)$$

여기서 $(\bar{\mathbf{D}}^p)_{n+1}$ 는 $\bar{\mathbf{T}}_{n+1}$ 에 의하여 기술되므로, 식 (15)이 내재적인(implicit) 함수임을 알 수 있다.

식 (7)은 $\mathbf{Q}(\mathbf{t})$ 변환계에서 적분한 것으로 미소변형도 조건의 내재적인 적분절차와 그대로 일치하고 있음을 알 수 있다(Hughes, 1984; 오세봉 1999). 이러한 적분절차를 구현하기 위하여 필요한 것은 유한 요소해석 코드의 구성관계 서브루틴에서 입력과 출력을 적절하게 수학적 과정과 일치시키는 것이다. 본 연구에서는 범용해석코드 ABAQUS에 적합한 수학적 전개를 채택한다.

식 (7)을 Cauchy 응력으로 전개하면 다음과 같다.

$$\mathbf{T}_{n+1} = \mathbf{T}^r - \mathbf{C}^e : \{\Delta \mathbf{t}(\bar{\mathbf{D}}^p)_{n+1}\} \quad (8)$$

여기서 새로운 시도응력의 정의는 다음과 같다.

$$\mathbf{T}^r = \mathbf{Q}_{n+1} \bar{\mathbf{T}}^r \mathbf{Q}_{n+1}^T = \mathbf{T}_n^Q + \mathbf{C}^e : \Delta \mathbf{E}_{n+1}^Q, \quad \mathbf{T}_n^Q = \mathbf{Q}_{n+1} \mathbf{T}_n \mathbf{Q}_{n+1}^T, \quad \Delta \mathbf{E}_{n+1}^Q = \mathbf{Q}_{n+1} \left\{ \int_r^{n+1} \bar{\mathbf{D}} dt \right\} \mathbf{Q}_{n+1}^T \quad (9)$$

식 (9)에 나타난 \mathbf{T}_n^Q 와 $\Delta \mathbf{E}_{n+1}^Q$ 는 변위를 계산하는 유한요소해법에서 응력적분절차의 입력으로 제공된다. 특히 ABAQUS에서는 \mathbf{Q}_{n+1} 이 Hughes-Winget(1980) 알고리즘에 의하여 결정되고 이에 따른 \mathbf{T}_n^Q 와 $\Delta \mathbf{E}_{n+1}^Q$ 를 사용자 서브루틴 UMAT에 입력으로 제공한다. 따라서 \mathbf{T}^r 을 쉽게 계산할 수 있다. UMAT에서의 출력은 Cauchy 응력과 상태변수들로 식 (8)에 나타난 내재적인 적분응력을 구하도록 코딩한다.

오세봉(1999)에 의하여 제안된 경계면과 항복면(그림 1)은 일반적인 응력장에 대하여 다음 식으로 나타난다.

$$F = (\mathbf{s}^* - \mathbf{b}) : (\mathbf{s}^* - \mathbf{b}) - R^2 = 0 \quad (10)$$

$$f = (\mathbf{s} - \boldsymbol{\beta}) : (\mathbf{s} - \boldsymbol{\beta}) - r^2 = 0 \quad (11)$$

이 때 경계면과 항복면 중심응력 텐서 \mathbf{b} 와 $\boldsymbol{\beta}$ 는 축차항(deviator term)을 의미하며, r 은 항복면의 반경이며 R 은 경계면의 반경이다. 한편 상동응력 축차텐서는 $\boldsymbol{\eta}$ 이다. \mathbf{s}^* 는 \mathbf{s} 를 $\boldsymbol{\eta}$ 로부터 경계면상에 방사적으로 투사한 응력상태이다.

반면 지반재료는 축차변형에 대하여 매우 연약한 거동이 나타나므로, 역재하과정에서 항복면의 크기는 소성축차변형률에 의하여 나타날 수 있다고 가정하였다. 즉,

$$\tilde{\varepsilon}^p = a \frac{(r/R)^b}{(1-r/R)^c} \quad (12)$$

이 때 계수 a , b 및 c 는 경화함수에 사용되는 재료계수들이다. 그리고 $\tilde{\varepsilon}^p$ 는 $\tilde{\varepsilon}^p$ 를 하나의 역재하과정내에서 적분한 변형도 척도이다.

응력적분은 응력적분, 항복면 방정식, 경화함수를 내재적으로 연립하여 풀어야 한다. 그리고 비선형계를 만족하는 해를 구하여야 한다. 자세한 과정은 오세봉(1999)에 기술되어 있다. 지배식의 풀이과정에서 Newton 법의 점근적인 2차 수렴도를 유지하기 위하여 수치적으로 적분된 응력에 일관된 접선계수(consistent tangent modulus)를 구하여 적용해야 한다 [Simo & Taylor(1985)]. ABAQUS의 UMAT에 상용하는 접선계수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mathbf{C}_{n+1}^k = \frac{\partial \mathbf{T}_{n+1}^k}{\partial \Delta \mathbf{E}_{n+1}^Q} = \mathbf{1} \otimes \frac{\partial \mathbf{T}_{n+1}^k}{\partial \Delta \mathbf{E}_{n+1}^Q} + \frac{\partial \mathbf{T}_{n+1}^k}{\partial \Delta \mathbf{E}_{n+1}^Q} \quad (13)$$

여기서 위 식의 각 항은 오세봉(1999)에 수록되어 있다.

4.예제해석

4.1 예제 1: 자중증가법의 사면안정해석

자중증가에 의한 사면안정해석방법은 사면의 자중을 시간함수인 증력가속도 $g(t)$ 를 일정하게 증가시켜 사면이 파괴하는 시점에서 저항력의 한계를 구하여 안전율을 표현하는 방법이다(서영교, 2001). 자

중증가법의 사면안정해석에서 중력가속도는 시간의 함수로서 다음과 같이 기술된다.

$$g(t) = g_{base} f(t) \quad (14)$$

여기서 g_{base} 는 입력치로 설정한 중력가속도의 크기와 방향을 나타내는 벡터이고, $f(t)$ 는 시간에 따른 중력가속도의 크기 변화를 조절하는 하중-시간 함수이다. 그러므로 자중증가법의 사면안정해석은 사면이 파괴되는 시점의 시간 $t = t_{lim}$ 을 구하는 문제로 그때의 토질이 지지할 수 있는 한계 중력가속도는 $g_{lim} = g_{base} f(t_{lim})$ 이므로 사면의 안전율은 다음과 같이 정의 된다.

$$FS_{gr} = \frac{g_{lim}}{g_{act}} \quad (15)$$

본 연구에서는 실제 중력가속도 $g_{act} = 9.81m/s^2$ 에 대하여 $g_{base} = 98.1m/s^2$ 로 설정하였으며, 파괴시점의 시간 t_{lim} 을 구하는 과정으로 자중증가에 의한 사면안정해석을 수행하였다. 대상 문제는 화강풍화토지반으로 기하학적인 형상은 앞장의 연약지반 성토문제와 동일한 기하학적 형상을 설정하였다. 그림 2는 대상지반의 제원 및 요소망을 나타내고 있다. 요소망은 사면이 파괴되는 형상을 나타내기 위해서 다소 촘촘하게 설정을 하였으며, 평면변형률 조건의 8절점(CPE8)요소를 사용하였다. 지반 요소는 초기응력이 없이 생성되었다. 해석시의 지반의 조건은 배수/비배수조건에 대하여 해석을 수행하였으며, 각각 미소변형조건과 대변형조건을 고려하였다. 또한 GUX 모델과 Mises 규준을 적용하여 거동특성을 비교하였다.

지반요소의 물성을 결정하기 위하여 삼축압축시험을 수행하였다. 삼축압축시험은 미소변형률수준에서 정확한 변위 계측을 확보할 뿐만 아니라 파괴규준을 포함하는 대변형률까지의 변형을 측정하기 위해서 LVDT를 이용한 국부변위측정 삼축압축시험을 수행하였다(오세봉 등, 2001). 따라서 지반요소의 물성은 삼축압축시험에서의 응력수준(50kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa, 400kPa)에 맞게 지층을 세분화하여 삼축압축시험의 결과로부터 구한 지반의 물성을 적용하였다. 지층의 응력수준 결정은 세분화한 지층의 중심에서 수직응력 σ_v 을 삼축압축시험에서의 응력수준과 같다고 가정하여 설정하였으며, 지표부위는 약간 과압밀상태로 가정하여 응력수준을 조금 높게 설정하였다.

Mises 규준의 해석시의 탄성계수(E)는 파괴장도(qmax)의 qmax/2에서의 할선탄성계수 값을 사용하였다. 배수조건에서 Poison비는 0.25로 가정하였으며, 비배수조건에서 Poison비는 0.5이다. 그림 3은 삼축압축시험에서의 응력-변형률관계와 Mises 규준과 GUX 모델의 예측치를 비교하여 나타내었다.

그림 4는 Mises 규준과 GUX 모델의 해석결과를 나타내었다. 그림 4(a)의 배수조건 해석시에는 성토사면 중앙의 수직변위는 Mises규준의 해석이 GUX 모델 보다 변위를 크게 예측하였다. 또한 변위가 증가함에 따라 미소변형조건에서의 변위가 더 크게 계산되고 있음을 알 수 있다. 이는 변위가 증가할수록 수학적 오차가 증가함을 의미한다. 그림 4 (b)는 비배수조건에 대한 결과로서, 성토사면 중앙의 수직변위는 하중시간단계에서 초기부분은 두 모델의 해석결과 변위가 비슷하게 예측이 되나, 시간단계가 증가할수록 GUX 모델이 Mises 규준보다 변위를 크게 예측하고 있다.

성토사면의 파괴 시점을 정의하기 위하여 마쯔오-가와무라방법을 이용하였다(Matsuo & Kawamura 1995). 이는 여러 성토지반에서 얻어진 파괴 사례로부터 성토형상이나 기초지반의 성질에 무관하게 파괴시의 ρ (성토 중앙부의 침하량)와 δ/ρ (δ 는 파괴법면의 수평 변위량)사이의 관계가 유일한 곡선으로 정의한다. 따라서 이 곡선을 하나의 파괴규준선으로 간주하여 사면의 안전율을 계산하였다. GUX 모델과 Mises 규준의 해석결과 파괴시점 $t = t_{lim}$ 와 이에 상응하는 g_{lim} 을 구하여 사면안전율을 구하였으며, 결과는 표 1에 정리하였다. 해석결과 배수조건에서는 Mises 규준이 GUX 모델보다 안전율을 과대 평가하는 경향을 볼 수 있다. 또한 미소변형조건으로 해석하는 경우 수학적 오차로 인하여 안전율을 과소평가 할 수 있음을 보여준다. 비배수조건에서는 두 모델의 해석결과가 거의 유사하게 나타났으며, 대변형조건에서의 해석이 다소 안전율이 크게 나타났다. 그림 5는 성토사면의 파괴시 변형형상을 나타내고 있다.

4.2 예제 2: 지반-말뚝계 해석

대상문제는 말뚝이 타입된 풍화토 지반으로 앞절과 마찬가지로 삼축압축시험 자료를 이용하여

Mises규준과 GUX모델의 재료계수를 구하였다. 풍화토지반은 단일지층으로 응력수준은 20kPa에 해당하도록 모델하였고, Mises규준과 GUX모델의 응력-변형률 관계를 그림 6에 나타내었다.

지반-말뚝계의 요소망의 세분화에 따른 정확도 및 효율성을 분석하고자 정확도 해석을 하였다. 그림 19는 지름 6cm, 길이 1.2m인 말뚝이 경계면에 영향을 미치지 않는 폭 1m, 깊이 2m인 지반에 타입 되어있는 것으로 설정하였다. 말뚝두부의 기준점에서 축방향으로 4cm의 변위가 생기도록 제어하였다. 이는 말뚝의 모형실험을 시뮬레이션한 것으로 말뚝은 강체(Rigid body) 지반은 선형 4절점과 8절점요소, 그리고, 축대칭조건을 적용하여 대변형해석을 하였다. 또한, 말뚝과 지반의 접촉면이 완전부착된 조건(TIE)으로 모델하였다. 따라서 정확도와 효율성을 고려하여 그림 7에 나타난 요소망에 선형 4절점 표준적분을 채택하였다.

Mises규준과 GUX모델을 적용하여 지반-말뚝계의 거동을 분석하였다. 그림 8에서 배수, 비배수 조건 모두 GUX모델은 최대하중에 도달하기 전에는 Mises규준에 비하여 하중이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 초기에는 응력-변형률관계와 같은 경향으로 GUX모델이 Mises규준에 비하여 같은 변위 수준에서 보다 높은 하중을 나타내고 있다. 하지만, 그림 9의 변형이 진행됨에 따른 배수에서는 변형률이 5%에서 비배수 조건에서는 0.5%에서 전이되는 과정을 나타내는 반면에 하중-변위관계에서는 변형이 증가할수록 전이된 시점 이후를 잘 반영하지는 못했다, 이는 선단부와 주면부의 요소들의 심한 찌그러짐으로 해에 오차를 수반하기 때문인 것으로 판단된다.

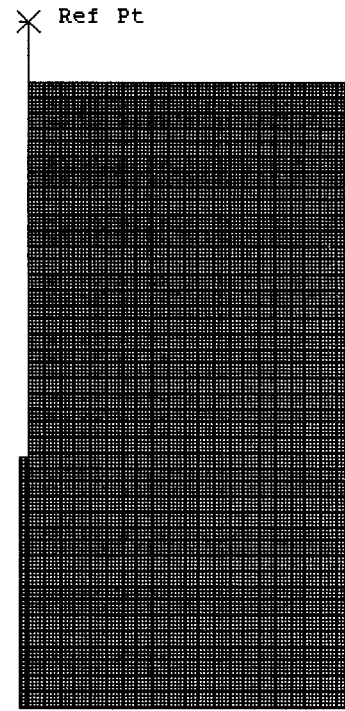


그림 7. 요소망의 세분화

5. 결론

본연구에서는 지반재료의 비등방경화 구성모델을 ABAQUS 코드에 구현하기 위한 정식화 과정을 기술하였다. 이를 위하여 (1) Hughes-Winget(1980) 알고리즘에 의하여 회전된 계에서 Jaumann 응력속도를 이용하여 대변형도 연속체 역학에 합당하도록 구성관계를 기술하였다. 그리고 (2) 해의 정확도를 확보하기 위하여 내재적 응력적분 기법을 정식화하고 (3) 비선형 지배식의 해 2차적 수렴도를 확보하기 위하여 일관된 접선계수를 정식화하였다. 이러한 정식화 과정은 ABAQUS 코드에서 제공하는 사용자 구성관계 서브루틴 UMAT에 합당하도록 이루어졌다. 그리고 본 논문의 정식화를 UMAT에 구현하여 비등방경화 탄소성 모델 GUX를 이용한 대변형 유한요소해석이 가능하도록 하였다.

이에 배수조건에 따라 ABAQUS를 이용한 대변형 문제 예제해석을 수행하였다. 풍화토 지반의 성토 안정성 해석을 통하여 미소변형해석은 수학적인 오차로 인하여 안전율을 과소평가하고 있음을 알 수 있었다. 또한 GUX 모델을 이용하여 실제 거동을 합리적으로 모델할 수 있었다. 배수조건은 해석시 중요한 인자로서 구성관계를 입력하는 과정에서 고려하는 것이 가능하였다. 말뚝 해석으로부터 요소망의 세분화에 따른 정확도가 중요한 인자임을 알 수 있었고 지반의 비배수 조건일 경우 두부에서의 저항에 크게 감소함을 확인하였다.

참고문헌

1. 서영교(2001), “사면안정해석의 수치 모델링”, 대한토목학회논문집 Vol.21, No.6-c, pp.625~632.
2. 오세봉(1999), “비등방경화 구성모델을 적용한 연약 지반의 비배수 거동 해석:Ⅱ. 수치해석”, 한국지

반공학회지, 제 10권 제 3호, pp.17~32.

3. 오 세 봉, 권 기 철, 김 동 수, 정 순 용 (2000), "미소변형을 및 대변형을 조건의 거동에 대한 비등방 경화 탄소성 구성모델," 한국지반공학회지, 16권, 1호, 65~73
3. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. (2001) ABAQUS/Standard User's Manual, version 6.2
4. Hughes, T. J. R. (1984). "Numerical Implementation of Constitutive Models: Rate-Independent Deviatoric Plasticity," in Nemat-Nasser, S., Asaro, R.J. and Hegemier, G. A. (Eds.), Theoretical Foundation for Large-Scale Computation of Nonlinear Material Behavior, Martinus Nijhoff Publishers, Boston, 29-57
5. Hughes, T. J. R. and Winget, J. (1980). " Finite Rotation Effects in Numerical Implementation of Rate Constitutive Equations Arising in Large Deformation Analysis," Int. J. for Numerical Method in Engineering, 15, 1862-1867
6. Lush, A. M., Weber, G. and Anand, L., (1989). "An Implicit Time-Integration Procedure for a Set of Internal Variable Constitutive Equations for Isotropic Elasto-Viscoplasticity," International Journal of Plasticity, 5, 521-549
7. Matsuo, M and Kawamura, K.(1977), "Diagram for Construction Control of Embankment on Soft Ground" , Soils and Foundations, Vol.17, No.3, pp.37~52.
8. Simo, J. C. and Hughes, T. J. R. (1998). Computational Inelasticity, Springer
9. Simo, J. C., Taylor, R. L. (1985). "Consistent tangent operators for rate-independent elastoplasticity," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,48, 101-118.

표 1. 배수조건에서 성토사면안정의 해석 결과

해석모델	변형조건	배수조건	비배수조건
GUX 모델	미소변형	3.3	2.9
	대변형	4.2	3.7
Mises	미소변형	4.4	3
	대변형	6.1	3.6

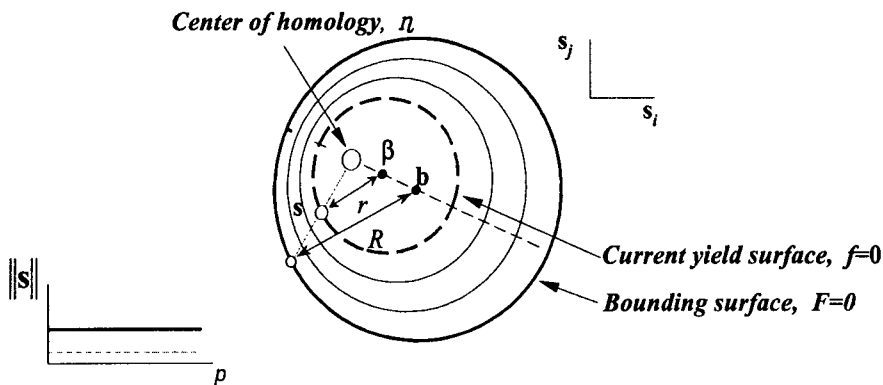


그림 1. 경계면과 항복면

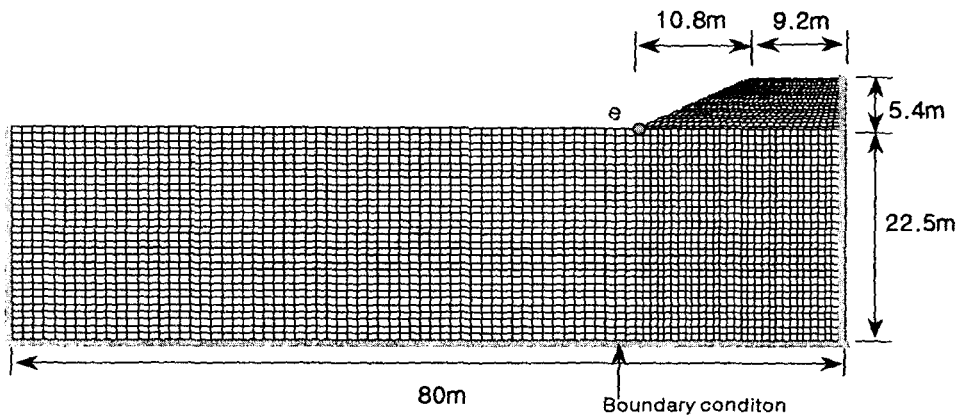
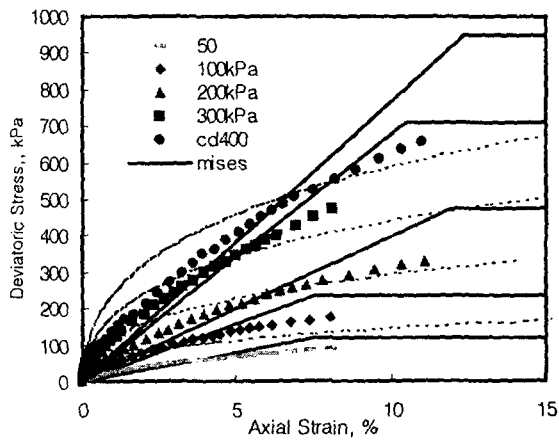
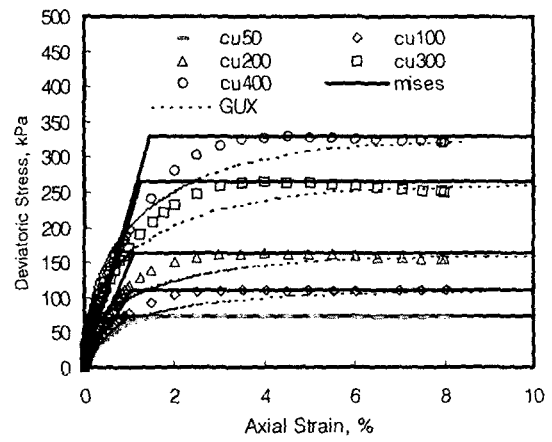


그림 2. 대상지반의 제원 및 요소망

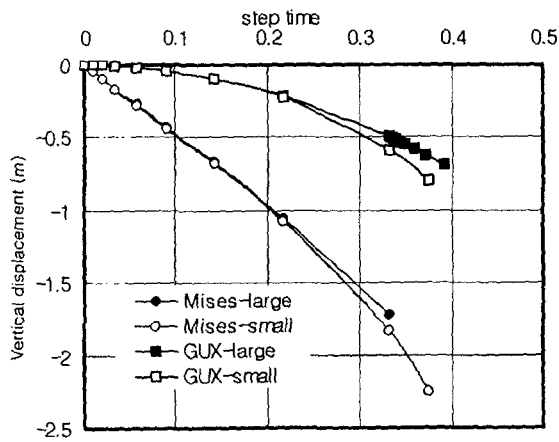


(a) 배수조건

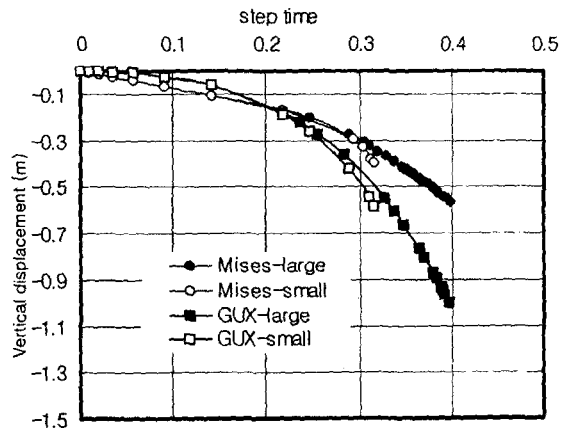


(b) 비배수조건

그림 3. 재료계수 값에 따른 각 모델의 응력-변형률 관계

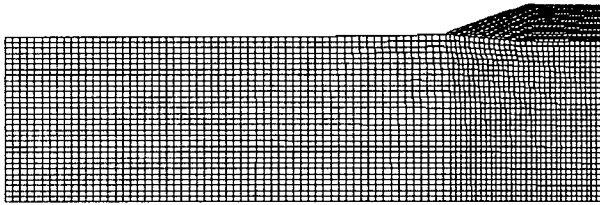


(a) 배수조건

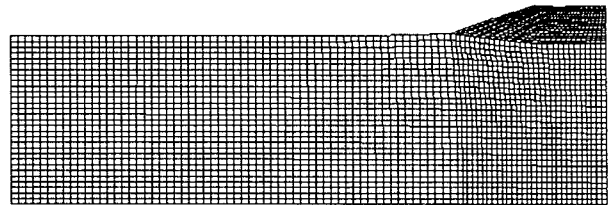


(b) 비배수조건

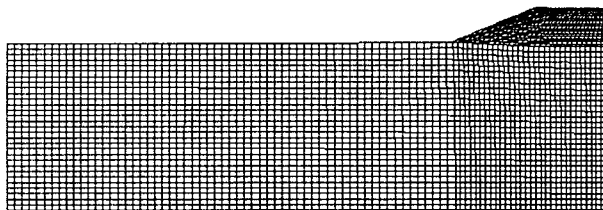
그림 4. 시간에 따른 침하량



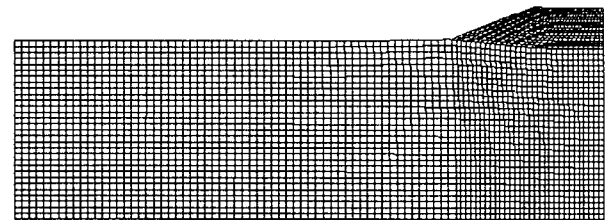
(a) 배수조건-미소변형



(b) 배수조건-대변형

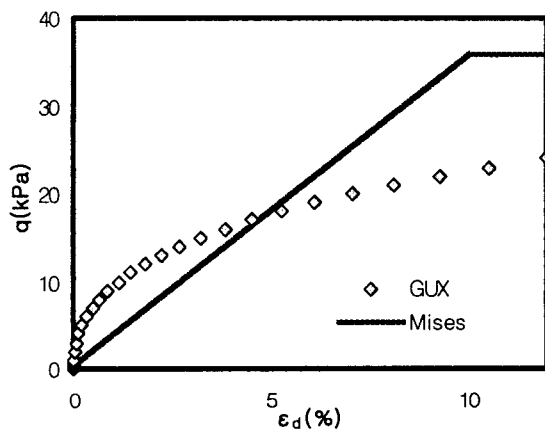


(c) 비배수조건-미소변형

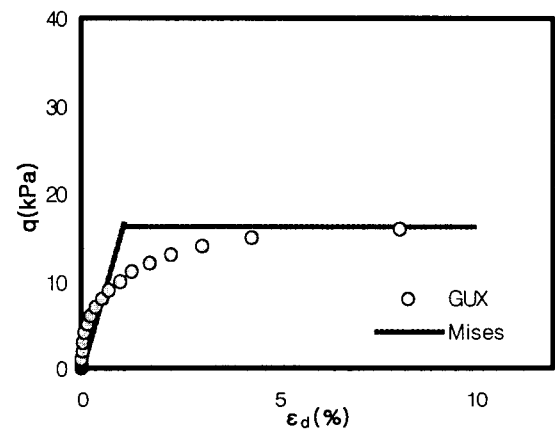


(d) 비배수조건-대변형

그림 5. 성토사면의 파괴시 변형형상

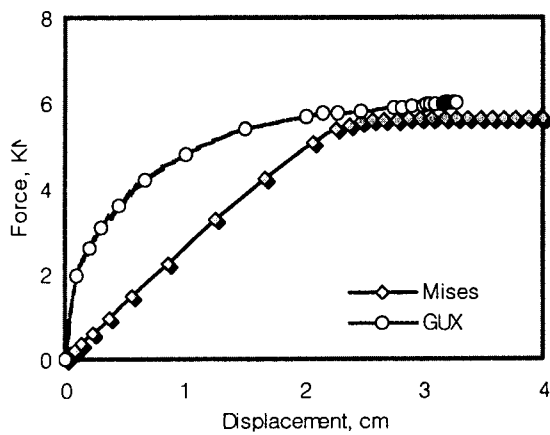


(a) 배수 조건

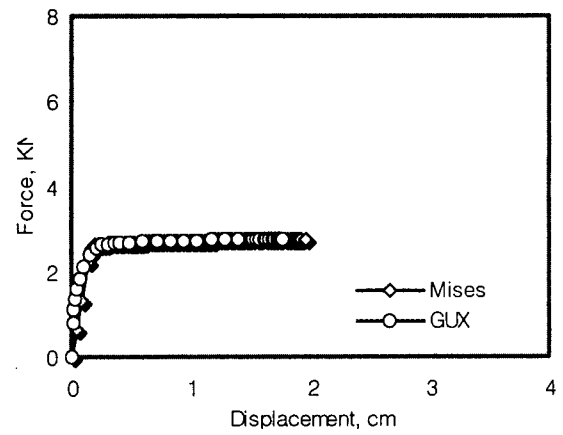


(b) 비배수 조건

그림 6. 응력-축차변형을 관계



(a) 배수 조건



(b) 비배수 조건

그림 8. Mises규준과 GUX모델의 하중-변위관계