

# 비등방경화 구성모델을 이용한 대변형 해석 : II. 해석

## Large Deformation Analysis Using an Anisotropic Hardening Constitutive Model : II. Analysis

전 병 곤\*<sup>1</sup> Jeon, Byung-Gon

한 성 수\*<sup>1</sup> Han, Sung-Su

오 세 봉\*<sup>2</sup> Oh, Se-Boong

### Abstract

In a companion paper (Oh, 2002), the constitutive model, called GUX model, was implemented as a user subroutine in ABAQUS code, where the GUX model could describe the behavior of overall strain range. An accuracy analysis verified that the implicit stress integration maintained the accuracy of solutions successfully. Since the GUX model is an anisotropic hardening elasto-plastic constitutive model based on total stress concept, geotechnical problems under fully drained or undrained condition can be analyzed after acquisition of stress-strain relationships from drained or undrained triaxial tests. This study includes the analyses of the stability of embankments on soft clays and weathered soils and the example of axially loaded soil-pile system. In the large deformation analyses, geometric nonlinearity was considered and the result of analyses with GUX model was compared with that of Mises model for the overall strain range behavior.

### 요 지

동반논문(오세봉, 2002)에서는 전체 변형도 영역의 거동을 모델할 수 있는 GUX 구성모델을 ABAQUS 코드(Hibbit 등, 2001)에 구현하였다. 먼저 정확도 해석을 통하여 동반논문에서 구현한 내재적 응력적분 기법이 해의 정확도를 확보함을 알 수 있었다. GUX 모델은 전응력 개념에 의거한 비등방경화 탄소성 구성모델이므로 완전 배수 또는 비배수 삼축시험시 응력-변형도 관계를 입력하여 대상문제를 배수 및 비배수조건에 따라 해석할 수 있다. 본 연구에서는 연약지반 및 풍화토 지반상 성토시 안정성 문제와 지반-말뚝계의 축하중 재하시 거동에 대한 예제 해석을 수행하였다. 그리고 대변형 해석을 통하여 기하학적 비선형성을 고려하였고 전체 변형도 거동을 합리적으로 모델하는 GUX 모델을 이용한 결과를 Mises 모델 결과와 비교하였다.

**Keywords :** ABAQUS, Embankments, Large deformation analysis, Nonlinear finite element analysis, Overall strain range behavior, Piles, Weathered soils

### 1. 서 론

동반논문(오세봉 2002)에서는 전응력 개념의 비등방경화 탄소성 구성관계인 GUX 모델에 대하여 (1) Jaumann 응력속도에 근거한 대변형도 구성관계를 정식화하고

(2) 내재적 응력적분 기법과 일관된 접선계수를 정식화하여 정확도 및 수렴도를 확보하였으며 (3) ABAQUS의 사용자 서브루틴 UMAT에 구현하여 실제 문제를 해석할 수 있도록 하였다.

이러한 연구는 미소변형에서 파괴에 이르는 전체 변

\*1 영남대학교 토목공학과 석사 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Yeungnam Univ.)

\*2 정회원, 영남대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Yeungnam Univ., sebungoh@yu.ac.kr)

형도 영역의 거동을 해석하는데 필요한 토대를 구축하는데 의미가 있다. 즉 미소변형도 영역의 거동을 실험적으로 획득하여 구성모델에 반영하고 대변형도 영역의 거동을 수학적으로 오차를 줄이며 해석할 수 있다. 본 논문에서는 이를 이용한 대변형 해석에 초점을 두고 있다.

GUX 모델은 전응력 개념에 의거한 구성관계로 연약지반의 비배수 거동과 풍화토의 일축적 거동을 모델하는데 적합하다. 이 때 지층을 강도에 따라 세분하고 상응하는 계수를 추출하여 해석에 적용할 수 있다. 그리고 대상문제가 겪는 응력경로는 실험적으로 도출한 응력경로와 동일해야 한다. 따라서 대상문제를 배수 및 비배수 조건으로 구분하여 지반이 삼축시험시 배수 및 비배수 시험 경로를 따른다고 가정하여 해석하는 것이 가능하다.

그림 1에서는 삼축시험시 GUX 모델의 유효응력경로를 보여주고 있다. 각 경로에 상응하는 실제 최대 축차 응력에서 Mises 규준을 정의하여 강도를 설정하고 파괴에 도달할 때까지 발생하는 변형을 모델할 수 있다. 단 소성 체적변형이나 간극수압의 변화는 무시한다.

실제 거동을 모델하기 위해서는 유효응력개념에 따른 파괴규준을 모델하고 소성 체적변형을 고려하여야 하지만, 풍화토의 경우에는  $K_0$  압축후 전단 거동을 모델하는 것이 까다로운 실정이다. 이 부분에 대한 연구는 본 논문에서는 다루지 않았다.

본 연구에서는 대변형 해석에 따른 거동의 차이, 배수 및 비배수 조건에 따른 침하량의 비교와 전체변형도 영역의 거동을 해석하는데 초점을 두고 있다. 먼저 동반 논문에서 정식화한 대변형도 문제의 내재적 응력적분

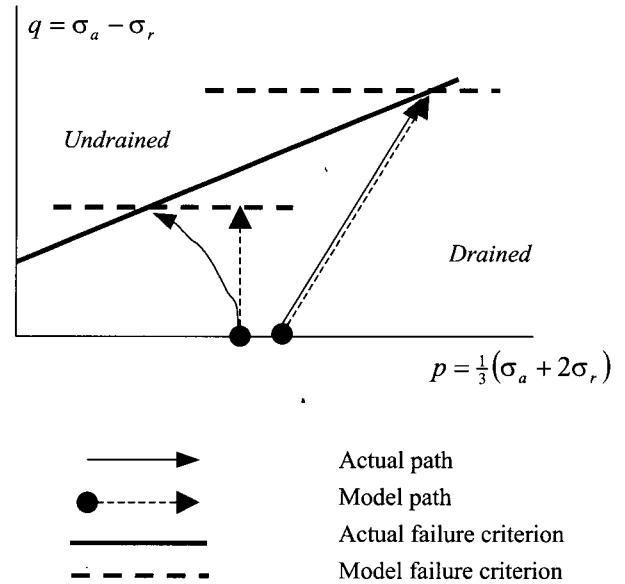


그림 1. GUX 모델에서의 유효응력경로

기법을 검증하기 위하여 정확도 해석을 수행한다. 그리고 일관된 접선계수로 점근적인 2차 수렴도를 확보한 후, 표 1과 같이 수치해석 예제를 수행하였다.

## 2. 예제 1 : 정확도 해석

내재적 응력적분 알고리즘의 정확도를 분석하기 위하여 ABAQUS의 8절점 축대칭 단일요소를 이용하여 대변형 해석을 수행하였다. 축방향 변형도 0.005, 0.05, 0.25씩 증가시켰을 때 축 응력-대수 변형도(logarithmic strain) 관계가 그림 2에서 보여진다. 재료계수는 최대축차응력  $q_{max}=947.0kPa$ 이고 경화함수에 필요한 계수  $a=$

표 1. 수치해석 개요

구분	예제 2	예제 3	예제 4
대상문제	연약지반의 비배수조건 성토 침하 해석	풍화토지반의 성토 안정성 해석	지반-말뚝계 해석
지반조사	비배수 전단강도는 현장 베인시험으로 획득, 변형계수 및 응력-변형도 관계는 비교란시료의 UU시험결과를 이용	풍화토 다짐시료의 배수/비배수 삼축시험	풍화토 다짐시료의 배수/비배수 삼축시험
해석모델 및 절차	<ul style="list-style-type: none"> <li>8절점요소, 평면변형도조건</li> <li>단계별 성토</li> <li>미소변형조건/대변형 조건 해석</li> <li>비배수 전단강도에 따라 연약지반 지층 구분</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>8절점요소, 평면변형도조건</li> <li>단계별 성토</li> <li>미소변형조건/대변형 조건 해석</li> <li>배수/비배수 조건</li> <li>과장된 중력가속도를 입력하여 안전을 계산</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>4절점요소, 축대칭조건</li> <li>미소변형조건/대변형 조건 해석</li> <li>배수/비배수 조건</li> <li>정확도 해석포함</li> </ul>
구성관계	<ul style="list-style-type: none"> <li>연약지반층은 다음 두 모델을 비교해석</li> <li>GUX 모델(비등방경화구성관계)</li> <li>MISES 모델(등방경화 구성관계)</li> <li>성토층은 DRUCKER-PRAGER 모델 이용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>GUX 모델</li> <li>MISES 모델</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>GUX 모델</li> <li>MISES 모델</li> </ul>
해석결과	성토고에 따른 변위, 지표변위 계산	성토고에 따른 변위, 안전을 계산	말뚝 두부의 하중-변위 관계

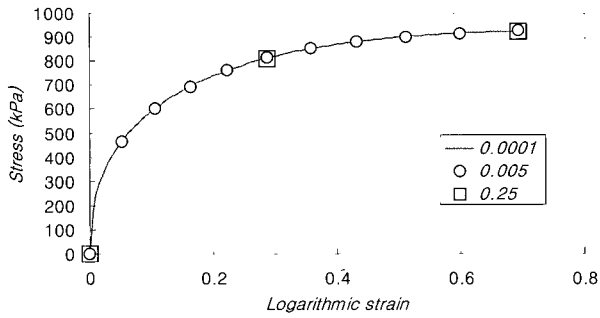


그림 2. 변형도 증분에 따른 응력-변형도 관계

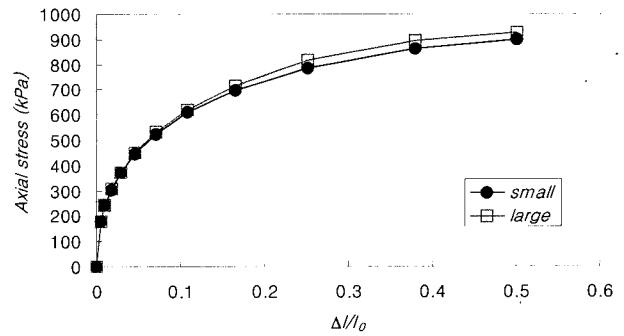


그림 3. 축응력-변위비 관계

0.2291,  $b=2.433$ ,  $c=0.3$ 이며 탄성계수  $E=262000\text{kPa}$ ,  $\nu=0.25$ 이다. 가장 작은 변형도 증가량 0.0001일 경우를 기준으로 볼 때 0.005, 0.25인 경우에 적분된 응력의 차이가 가시적으로 확인하기 어려울 정도로 일치하였다. 이로부터 적분이 정확하게 수행된 것으로 판단된다.

축변위와 초기 길이의 비 ( $\Delta l/l_0$ )에 따른 축응력 (Cauchy 응력)이 그림 3에서 보여진다. 대변형 해석시에는 변위비가 0.1이상일 경우에 미소변형도 조건에 비하여 응력이 크게 나타났다. 이러한 오차가 많은 요소로 구성된 요소망에서 미소변형 해석시 누적되면, 동일한 하중에 대하여 변위를 과대평가하게 된다.

동반논문(오세봉 2002)에서 사용된 경화함수 (28)은 다음과 같이 분해될 수 있다.

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

이 때 계수  $a$ ,  $b$  및  $c$ 는 경화함수에 사용되는 재료계수들이다. 그리고  $\tilde{\varepsilon}^p$ 는  $\tilde{\varepsilon}^p$ 를 적분한 변형도 척도로 삼축 조건시  $\tilde{\varepsilon} = \frac{2}{3}(\varepsilon_a - \varepsilon_r)$ 이다. 대변형도 기하조건에 적합하게 구성관계의 계수를 구하기 위해서는  $\tilde{\varepsilon}^p$ 를 추출하는 것이 합당하지만 편의상 식 (1)과 같이  $\tilde{\varepsilon}^p$ 를 이용하여 다음 절차에 따라 구할 수 있다(오세봉 1999).

- (1) 삼축실험시  $r/R$ 은 축차응력  $q/q_{\max}(q = \sigma_a - \sigma_r)$ 로 정의한다.
  - (2) 탄성변형도를 구한다. 즉  $\tilde{\varepsilon}^e = q/3G$ . 여기서 초기전단계수  $G$ 는 일정한 값으로 가정하고 미소변형조건의 최대 전단계수로 정의하는 것이 적합하다. 또는 Young 계수와 Poisson 비로부터  $G = E/2(1 + \nu)$ 와 같이 구한다.
  - (3) 식 (1)에서 계수  $c$ 를 0.3으로 가정하면 좌항과 우항을 실험적으로 구할 수 있다.
- 이 때 변형도를 미소변형조건에 따라 초기형상을 기준

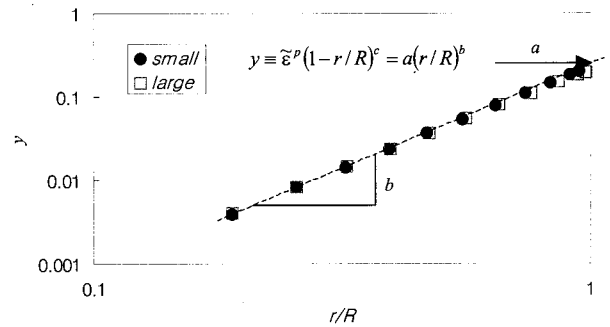


그림 4. 계수 추정과정

으로 정의하거나 대변형조건에 상응하는 변형도로 정의할 수 있다. 그림 4에서는 미소변형도 ( $\varepsilon_a = \Delta l/l_0$ ) 및 대수 변형도 ( $\varepsilon_a = \ln(1 + \Delta l/l_0)$ )로 정의한 경우를 비교하고 있다. 경화 함수의 계수  $a$ 와  $b$ 를 구하는 과정에서 변형도의 정의는 거의 영향을 끼치지 않는 것을 알 수 있다. 특히 실험자료의 분산을 고려하면, 이러한 차이는 의미가 없어진다. 따라서 실험자료 분석시에는 미소변형도를 이용하여 식 (1)의 계수를 구할 수 있다고 판단된다.

동반논문의 일관된 점선계수에 대한 정식화는 ABAQUS를 이용한 해석시 점근적인 2차 수렴도를 확보할 수 있었다. 이로부터 계산시간이 많이 소요되는 실제 문제의 해석을 효율적으로 수행할 수 있다.

### 3. 예제 2 : 연약지반의 비배수 거동 해석

#### 3.1 해석절차 및 지반 물성

해석의 대상지반은 말레이시아 Muar평원의 연약지반 시험성토사레이다(MHA 1989, Brand 1991, 오세봉 1999). 성토체의 제원은 폭 40m, 길이 60m로서 성토시 0.2m씩 주당 약 0.4m 속도로 급속하게 다짐 시공하였다.

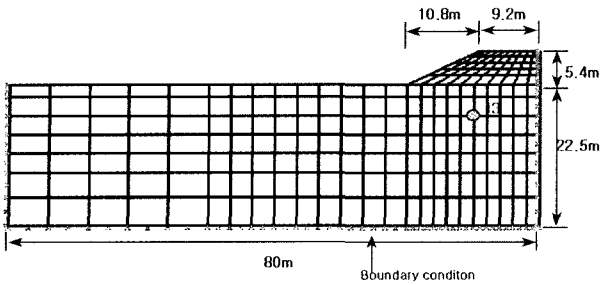


그림 5. 대상지반의 제원 및 요소망(예제 2)

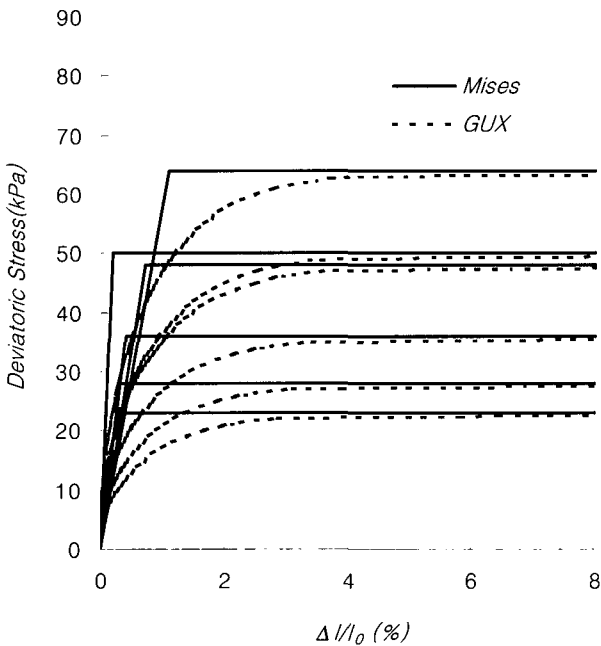


그림 6. 지층의 응력-변형도 관계(예제 2)

그림 5는 해석 대상지반의 제원 및 요소망을 나타내며, 평면변형도 조건하의 8절점요소(CPE8)로 요소망을 설정하였다. 연약지반 요소는 초기응력이 없이 생성된다. 성토층은 층별로 생성하되 물체력(body force)에 하중-시간함수를 적용하여 각 층의 하중을 세분화하도록 하였다. 그리고 성토층은 Drucker - Prager 파괴규준을 적용하였고, 지반 요소는 GUX 모델 또는 Mises 모델을 각각 적용하였다.

표 2. 지층 및 성토체의 재료계수(예제 2)\*

지 층	구 분	1	2	3	4	5	6
	Depth(m)	0 ~ 2	2 ~ 5	5 ~ 8	8 ~ 11	11 ~ 14	14 ~
	S <sub>u</sub> (kPa)/q <sub>max</sub>	25/50	11.5/23	14/28	18/36	24/48	32/64
	Mises 모델, E <sub>s</sub> (kPa)	25500	6600	8933	9120	6593	5884
	GUX 모델	a=0.0122, b=2.0714, c=0.3, E=98000kPa, ν=0.4999					
성토체	E=5100kPa, ν=0.3, γ=20.5kN/m <sup>3</sup> , c=30kPa, φ=37°						

\* 지층의 경우 q<sub>max</sub>, ν=0.4999는 두 모델 모두 동일하게 적용

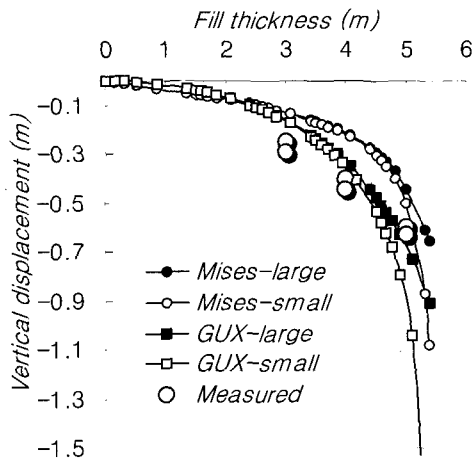
해석시 지반의 물성은 MHA(1989)에 의하여 제공된 값을 사용하였으며 표 2에 정리하였다. 연약지층은 비배수 전단강도에 따라 6개 지층으로 구분되었으며 각 층의 최대축차응력 q<sub>max</sub>가 Mises 모델과 GUX 모델의 입력치로 이용된다. Mises 모델의 경우에는 할선 Young 계수(E<sub>s</sub>)가 층별로 입력되고 GUX 모델은 q<sub>max</sub>로 기준화된 응력-변형도 관계가 일치하도록 계수를 설정하였다(오세봉 1999). 그리고 Poisson 비는 0.4999로 전응력 개념에 따른 비배수 조건을 모델하였다. 그림 6에서는 두 모델의 지층별 응력-변형도 관계를 비교하였다

### 3.2 해석 결과

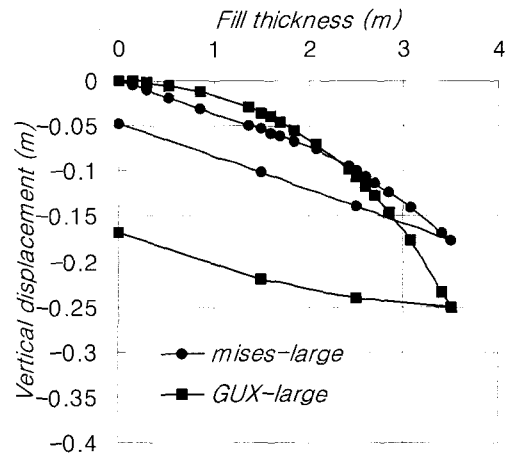
계측결과에 대하여 Mises규준의 해석과 GUX 모델의 해석 결과를 비교하여 분석하였다. 또한 미소변형조건과 대변형조건의 해석 결과를 비교하였다. 그림 7은 성토고에 따른 변위를 나타낸 것이다. 그림 7(a)는 성토체 중앙의 수직변위 결과로서 GUX 모델이 Mises 규준보다 변위를 크게 예측하였다. 또한 성토고 2m 이전에서는 미소변형도 조건의 변형계수를 적절하게 고려할 수 있는 GUX 모델이 침하량을 작게 계산하였다. GUX 모델은 미소변형도 조건에서 변형계수의 변화를 모델할 수 있는 특징이 있다(오세봉, 1999). 계측치와 비교하여 보면 전반적으로 GUX 모델이 실제 침하량을 잘 예측할 수 있었다.

대변형에 따른 기하학적 비선형성을 고려한 경우에, 약 4m 성토시까지는 변위가 유사하게 나타나지만 그 이후에는 변위가 적게 일어난다. 이는 대변형 해석시 미소변형조건에서 나타나는 오차를 줄이거나 배제한 까닭이다. 특히 파괴에 이르는 성토고에서는 미소변형조건의 해석에서는 변위가 급작스럽게 일어나고 파괴시 성토고를 낮게 계산할 수 있다.

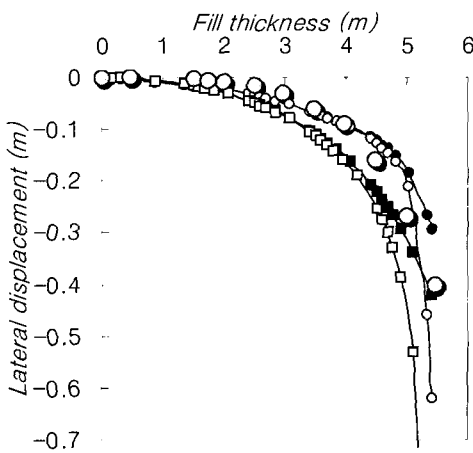
그림 7(b)는 I3지점(그림 5 참조)에서의 수평변위를



(a) 성토체 중앙의 수직변위

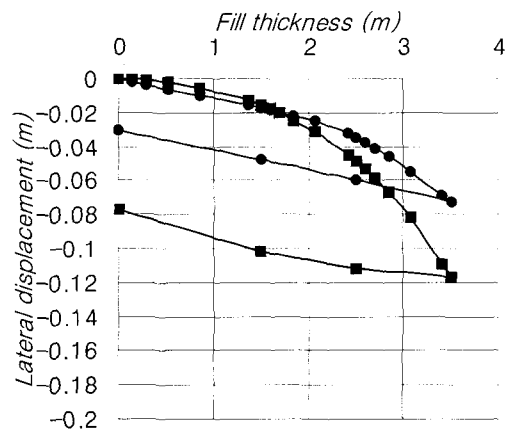


(a) 성토체 중앙의 수직변위



(b) I3지점의 수평변위

그림 7. 성토고에 따른 변위



(b) I3의 수평변위

그림 9. 상토하중 재하 및 제거에 따른 변위

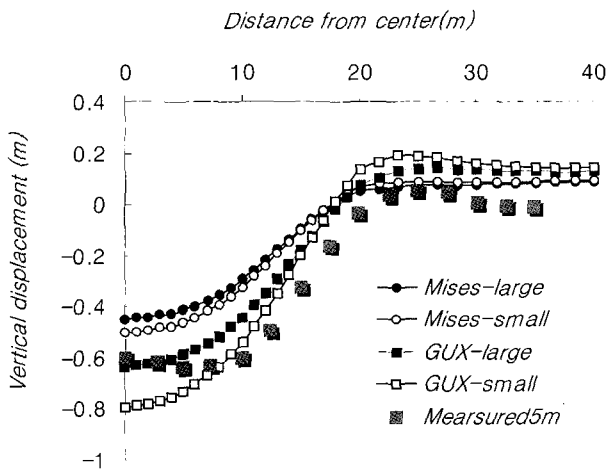


그림 8. 지표의 수직변위(성토고 5m)

나타내고 있다. GUX 모델이 Mises 기준보다 다소 크게 변위를 계산하였으며 전반적인 변위양상은 GUX 모델이 실제 거동과 유사하게 나타나고 있다. 또한 대변형

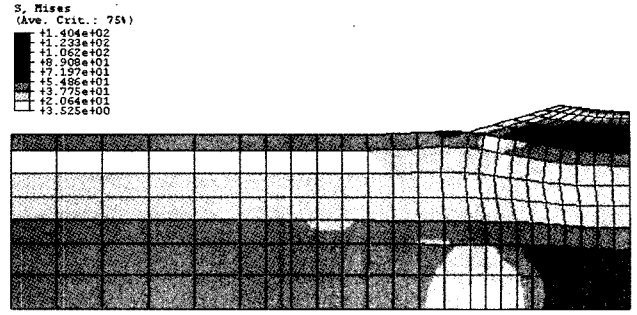
해석을 통하여 파괴시점 부근의 변위양상을 잘 예측할 수 있었다.

그림 8에서는 성토고 5m에 대한 지표의 수직변위를 나타내고 있다. 전반적인 경향은 Mises기준보다 GUX 모델의 해석 결과가 잘 예측하고 있다. 대변형해석의 경우에는 중심부의 침하량뿐 아니라 성토체 주변의 용기량도 감소하고 있다.

그림 9에서는 3.5m까지 성토한후 다시 단계적으로 성토층을 제거하였을 때 변위를 나타내고 있다. 성토제거 과정에서 지반의 수직변위는 약 0.1m 정도 팽창하였으며, Mises 모델 해석이 GUX 모델보다 다소 크게 나타나고 있다. 반면 GUX 모델의 경우에는 수직 및 수평 변위의 팽창양상이 성토하중을 제거할수록 증가하는 비선형적 형태를 나타내고 있다. 성토과정에서는 GUX 모델의 변위량이 크게 나타나지만 성토 초기부에서는 오히려 작은 변위가 일어남을 확인할 수 있다.



(a) 대변형 조건



(b) 미소변형 조건

그림 10. 성토고 5.4m에서의 축차응력(q) 등고선

그림 10에서는 성토고 5.4m에서의 변형형상과 축차 응력(q) 등고선을 보여주고 있다. 대변형해석의 경우에 최대응력과 침하량이 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

### 4. 예제 3 : 자중증가법에 의한 사면안정해석

#### 4.1 자중증가에 의한 사면안정해석 방법

자중증가에 의한 사면안정해석방법은 사면의 자중을 과장하여 점진적으로 물체력을 증가시킨 후 사면이 파괴하는 시점에서 안전율을 구하는 방법이다(서영교, 2001). 이 때 중력가속도는 시간의 함수로서 다음과 같이 기술된다.

$$g(t) = g_{base} f(t) \quad (2)$$

여기서  $g_{base}$ 는 입력치로 설정한 중력가속도의 크기이고,  $f(t)$ 는 하중-시간 함수로 최대값이 1이다. 그러므로 자중증가법의 사면안정해석은 사면이 파괴되는 시점의 시간  $t = t_{lim}$ 을 구하는 문제로 한계 중력가속도는 다음과 같이 정의된다.

$$g_{lim} = g_{base} f(t_{lim}) \quad (3)$$

이에 따른 사면의 안전율은 다음과 같이 정의 된다.

$$FS_{gt} = \frac{g_{lim}}{g_{act}} \quad (4)$$

본 연구에서는 실제 중력가속도  $g_{act} = 9.81 m/s^2$ 에 대하여  $g_{base} = 9.81 m/s^2$ 로 설정하였다.

### 4.2 해석절차 및 지반 물성

대상 문제는 가상적인 화강풍화토 지반으로 기하학적인 형상은 앞 장의 연약지반 성토문제와 동일하게 설정하였다. 그림 11은 대상지반의 제원 및 요소망을 나타내고 있다. 요소망은 사면이 파괴되는 형상을 나타내기 위해서 다소 촘촘하게 설정을 하였으며, 평면변형도 조건의 8절점(CPE8)요소를 사용하였다. 지반 요소는 초기응력이 없이 생성되고, 사면의 중력가속도  $g_{base} = 9.81 m/s^2$ 로 실제 중력가속도의 10배 값으로 설정하였다.

해석시의 지반의 조건은 배수 및 비배수조건에 대하여 해석을 수행하였다. 비배수조건은 응력-변형도 관계를 비배수 삼축압축시험 결과로부터 모델하고 Poisson 비를 0.4999로 입력하여 구현하였다. 또한 GUX 모델과 Mises 규준을 적용하여 거동특성을 비교하였다.

지반요소의 물성을 결정하기 위하여 삼축압축시험을 수행하였다. 삼축압축시험은 미소변형도수준에서 정확한 변위 계측을 확보할 뿐만 아니라 파괴규준을 포함하는 대변형도까지의 변형을 측정하기 위해서 LVDT를 이용한 국부변위측정을 수행하였다(오세봉 등, 2001).

따라서 삼축압축시험에서의 응력수준(50kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa, 400kPa)에 맞게 지층을 세분화하였으

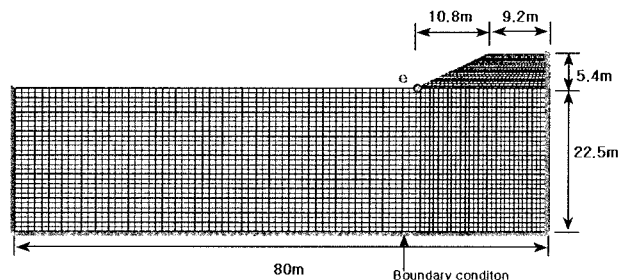
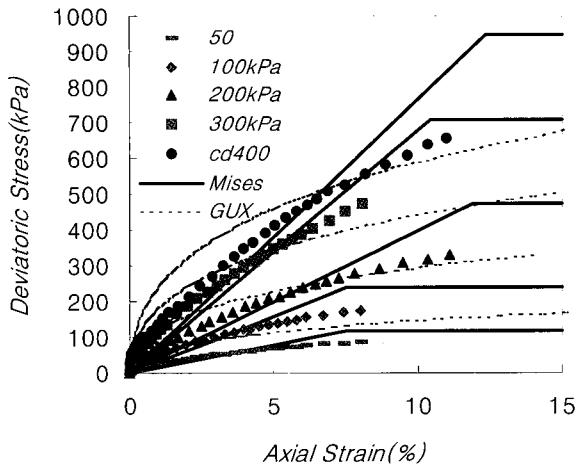
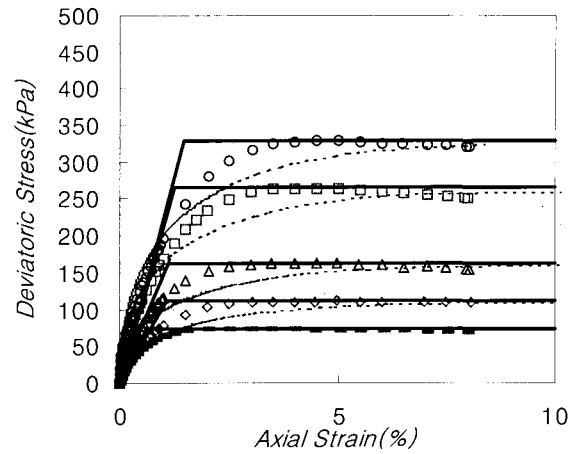


그림 11. 대상지반의 제원 및 요소망(예제 3)



(a) 배수조건



(b) 비배수조건

그림 12. 응력-변형도 관계(예제 3 ; 여기서 Axial strain  $\equiv \Delta l/l_0$ )

표 3. Mises 모델과 GUX 모델의 재료계수(예제 3)

배수 조건	Depth (m)	응력수준 (kPa)	qmax (kPa)	$\nu$	Mises	GUX			
					$E_s$ (Mpa)	$E_{max}$ (Mpa)	a	b	c
배수	성토사면	50	119	0.25	1.58	64	0.2291	2.4326	0.3
	0 ~ 3	50	119		1.58	64			
	3 ~ 9	100	237		3.15	71			
	9 ~ 15	200	474		3.97	115			
	15 ~ 21	300	710		6.79	212			
	21 ~	400	947		7.66	262			
비배수	성토사면	50	74	0.5	11.84	64	0.0245	2.5704	0.3
	0 ~ 3	50	74		11.84	64			
	3 ~ 9	100	111		10.5	71			
	9 ~ 15	200	163		14.83	156			
	15 ~ 21	300	265		21.25	258			
	21 ~	400	329		22.4	337			

며, 각 지층의 중심에서 수직응력  $\sigma_v$ 를 삼축압축시험에서의 응력수준과 같다고 가정하였다. 지표부근은 과압 밀상태로 가정하여 응력수준을 다소 높게 설정하였다.

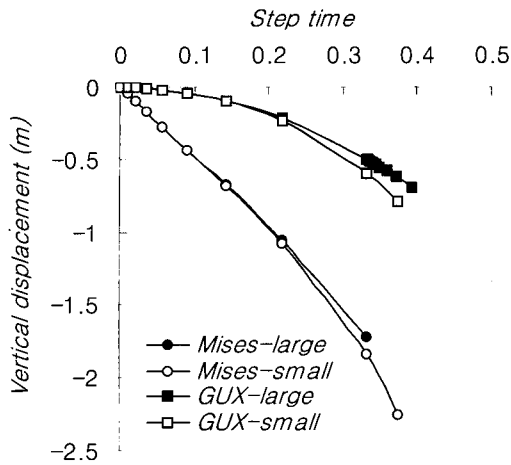
Mises 규준의 해석시의 탄성계수 ( $E_s$ )는 강도( $q_{max}$ )의 50% 응력에서 할선계수로 구하였다. 배수조건에서 Poisson 비는 0.25로 가정하였으며, 비배수조건에서 Poisson 비는 0.5이다. 그림 12에서는 배수 및 비배수 삼축압축시험에서의 응력-변형도관계와 Mises 모델 및 GUX 모델을 비교하여 나타내었다. 각 모델의 재료계수를 표 3에 정리하였다.

#### 4.3 해석 결과

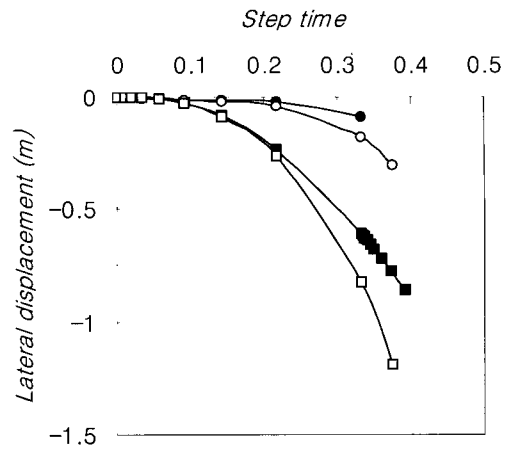
입력된 중력가속도  $g_{base} = 9.81 m/s^2$ 에 대하여 단계시

간(step time)이 1.0일 때까지 선형적으로 자중을 증가시켰다. 그림 13에서는 배수조건에서 Mises 규준과 GUX 모델의 해석결과를 변형조건에 따라 나타내었다. 그림 13 (a)에서 성토사면 중앙의 수직변위는 Mises 규준의 해석이 GUX 모델 보다 변위를 매우 크게 예측하였다. 반대로 그림 13 (b)에서 사면전단의 수평변위는 GUX 모델이 Mises 규준보다 변위를 크게 예측하였다. 또한 대변형 해석시에 시간이 지남에 따라 미소변형조건에 비하여 작게 계산되고 있다. 이는 변위가 증가할수록 미소변형해석의 경우에 수학적 오차가 증가함을 의미한다.

그림 14에서는 비배수조건에 대한 결과를 보여준다. 그림 14 (a)에서 성토사면 중앙의 수직변위는 초기에는 두 구성모델의 해석결과가 유사하지만, 시간단계가 증

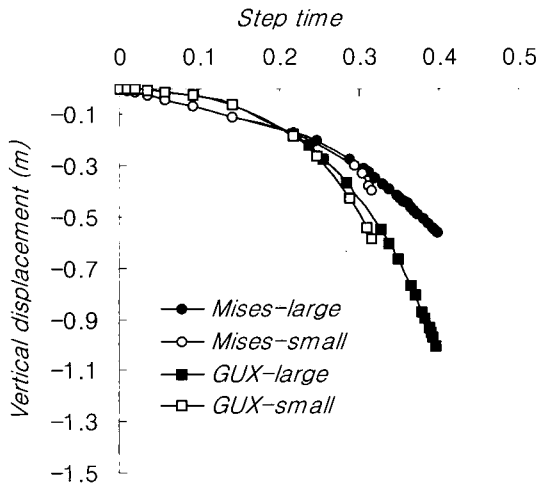


(a) 성토사면 중앙의 수직변위

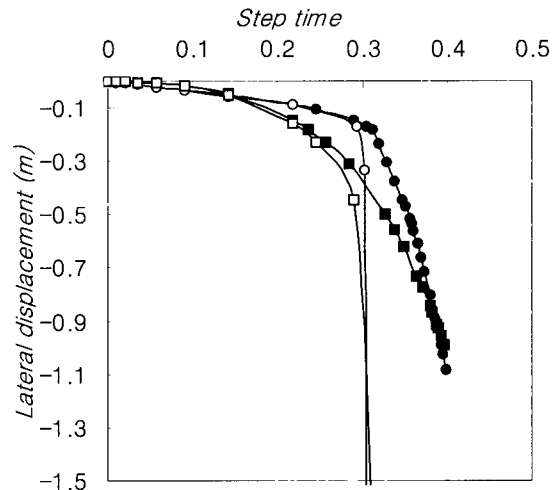


(b) 성토사면 선단 e의 수평변위

그림 13. 배수조건시 시간에 따른 변위



(a) 성토사면 중앙의 수직변위



(b) 성토사면 선단 e의 수평변위

그림 14. 비배수조건시 시간에 따른 변위

가할수록 GUX 모델이 Mises 기준보다 변위를 크게 예측하고 있다. 그림 14 (b)에서 성토사면선단의 수평변위는 GUX 모델이 Mises 기준보다 변위를 다소 크게 예측하고 있다 특히 미소변형조건에서는 급격하게 변위가 증가하여 파괴 시점이 나타나고 있다.

성토사면의 파괴 시점을 정의하기 위하여 마쯔오-가와무라방법을 이용하였다(Matsuo & Kawamura, 1977). 이는 여러 성토지반에서 얻어진 파괴 사례로부터 성토형상이나 기초지반의 성질에 무관하게 파괴 시의  $\rho$ (성토 중앙부의 침하량)와  $\delta/\rho$ ( $\delta$ 는 파괴법면의 수평 변위량)사이의 관계가 유일한 곡선으로 정의할 수 있다는 개념이다. 따라서 이 곡선을 하나의 파괴기준선으로 간주하여 성토시공 중에 관측된 변위과정을  $\rho \sim \delta/\rho$  도 상에 도시

할 경우, 그 궤적이 파괴기준선에 접근하는지 아니면 멀어지는지의 여부를 판단함으로써 성토의 안정 및 불안정성을 검토할 수 있다. 마쯔오-가와무라방법은 연약지반을 대상으로 한 사례연구를 토대로 하고 있으므로 풍화토 사면에 적용할 수 있다고 보기는 어렵다. 그러나 대상문제의 해석 결과, 파괴시점이 명확하게 정의되지 않으므로 불가피하게 일관된 기준을 필요로 하였다.

그림 15에서 보여지듯이 성토사면 중앙에서의 침하량과 선단에서의 수평변위의 비가 각 해석결과에 대하여 비교되었다. 본 연구에서는 파괴 기준면과 만나는 시점을 파괴로 간주하였다. 배수조건인 경우 Mises 모델은 수평변위비보다는 침하량이 증가하며 파괴가 발생하였고 GUX 모델은 수평변위와 침하의 비가 증가하며



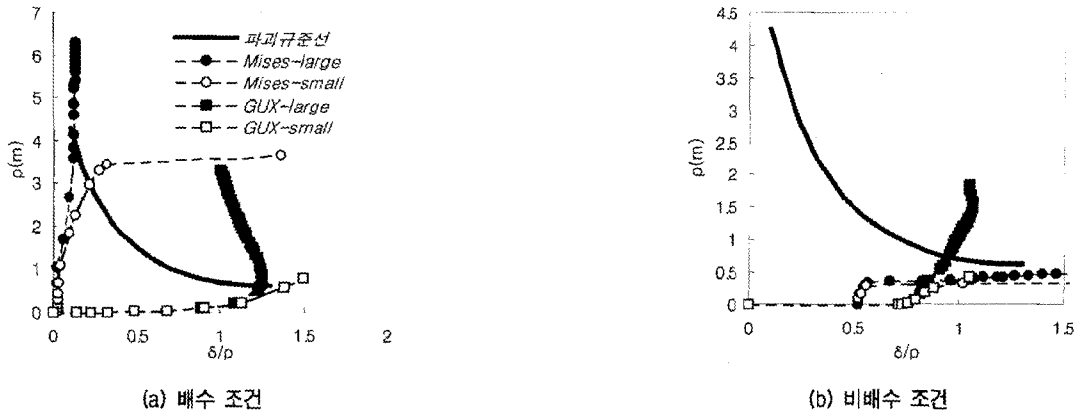


그림 15. 침하량과 축방변위량을 이용한 안정관리도

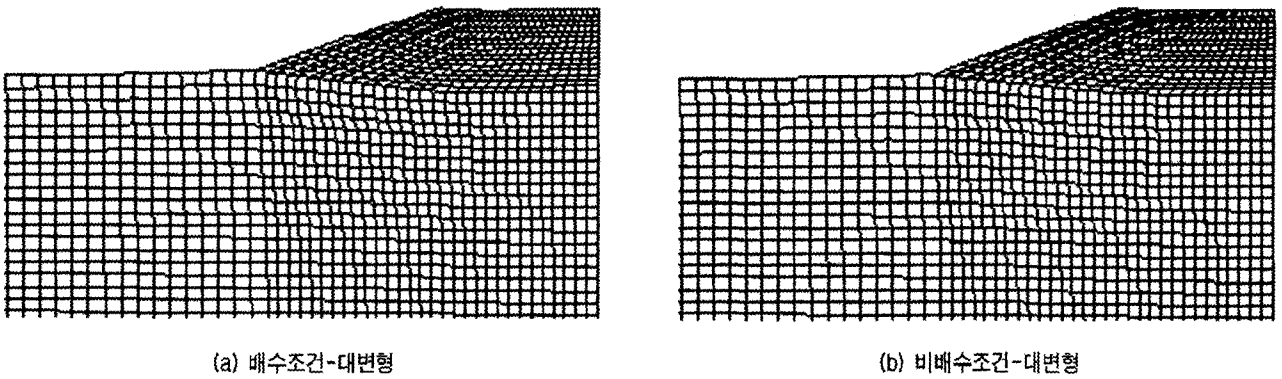


그림 16. 성토사면의 파괴시 변형형상

파괴가 유발되었다. 비배수 조건에서는 Mises 모델의 경우에 수평변위비가 급작스럽게 증가하는 양상을 나타냈다.

이러한 해석결과 나타난 파괴시점  $t = t_{lim}$  와 이에 상응하는  $g_{lim}$  을 구하여 사면안전을 구하였으며, 결과는 표 4에 정리하였다. 배수조건에서는 Mises 규준이 실제 거동을 잘 반영하는 GUX 모델보다 안전율이 크게 나타났으므로, Mises 규준이 안전율을 과대 평가하는 경향을 볼 수 있다. 또한 대변형조건의 해석이 미소변형

조건보다 다소 안전율이 크게 나타났다. 이는 미소변형 조건으로 해석하는 경우 수학적인 오차로 인하여 안전율을 과소평가 할 수 있음을 보여준다. 비배수조건에서는 두 모델의 해석결과가 거의 유사하게 나타났으며, 대변형조건의 해석이 다소 안전율이 크게 나타났다. 전체적으로 배수조건시의 사면의 안전율이 비배수조건보다 다소 크게 나타났다. 그림 16은 성토사면의 파괴시 변형형상을 나타내고 있다.

표 4. 배수조건에서 성토사면안정의 해석 결과

해석모델		변형조건	$t = t_{lim}$	$g_{lim} (m/s^2)$ ( $= g_{base} t_{lim}$ )	$FS_{crit}$ ( $= g_{lim} / g_{act}$ )
배수 조건	GUX 모델	미소변형	0.33	32.37	3.3
		대변형	0.42	41.2	4.2
	Mises 모델	미소변형	0.44	43.16	4.4
		대변형	0.61	59.84	6.1
비배수 조건	GUX 모델	미소변형	0.29	28.45	2.9
		대변형	0.37	36.3	3.7
	Mises 모델	미소변형	0.3	29.43	3
		대변형	0.36	35.32	3.6

표 5. 재료계수(예제 4)

조건	$a^*$	$b^*$	$c^*$	$E_{max}^*$ (kPa)	$E_s^{**}$ (kPa)	$\nu$	$q_{max}$ (kPa)
배수	0.2291	2.4326	0.3	19673	300	0.25	36
비배수	0.0245	2.5704	0.3	20470	1500	0.4999	16.27

\* GUX 재료계수  
 \*\* Mises 재료계수

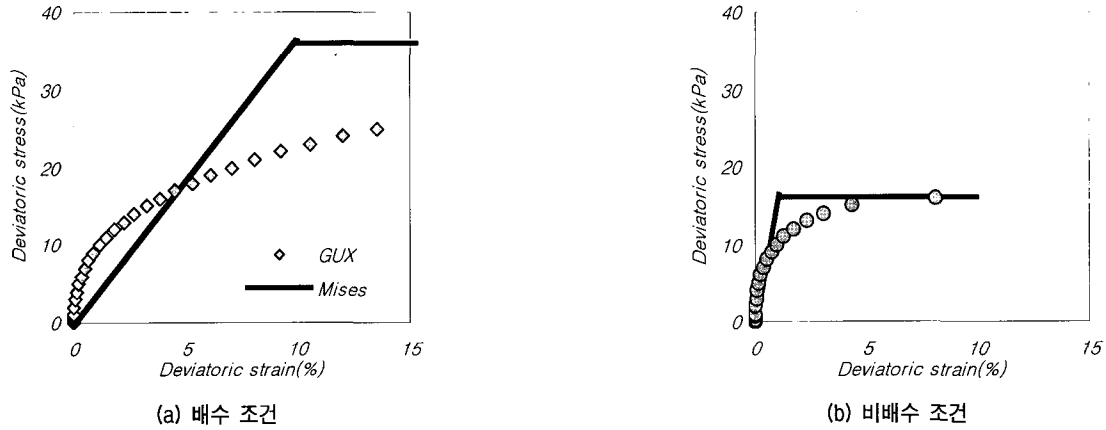


그림 17. 축차응력-변형도 관계(예제 4)

## 5. 예제 4 : 말뚝의 연직재하 해석

### 5.1 지반물성

대상문제는 모형말뚝실험으로 지름 6cm, 길이 1.2m 인 말뚝이 반단면의 폭 1m, 깊이 2m인 풍화토 지반에 관입된 상태이다. 풍화토지반의 물성은 4장과 마찬가지로 삼축압축시험 자료를 이용하여 Mises 모델과 GUX 모델의 재료계수를 구하여 표 6에 나타내었다. 그리고 지반은 단일지층으로 구속응력 수준은 20kPa에 해당하도록 구성관계를 모델하였고 응력-변형도 관계를 그림 17에 나타내었다. 여기서 축차응력  $q = \sigma_a - \sigma_r$ 로 정의되고 축차변형도는  $\tilde{\epsilon} = \frac{2}{3}(\epsilon_a - \epsilon_r)$ 로 정의되는데, 편위상 변형도는 미소 변형도를 이용하여 나타냈다.

### 5.2 요소망에 따른 정확도 해석

지반-말뚝계의 요소망의 세분화에 따른 정확도 및 효율성을 분석하고자 정확도 해석을 하였다. 그림 18에서 보여지듯이 말뚝두부의 기준점에서 축방향으로 4cm (말뚝지름의 2/3)의 변위가 생기도록 제어하였다. 말뚝은 강체(Rigid body)로 모델하였으며, 지층의 요소망은 선형 4절점과 9절점 축대칭요소(표준적분)를 적용하여 대변형해석을 하였다. 또한, 말뚝과 지반의 접촉면이

완전 부착된 조건으로 모델하였다. 말뚝이 관입된 지반에 대한 유한요소 해석모델은 말뚝이 가늘고 긴 형상을 띠고 있을 뿐 아니라 말뚝과 지반과의 강성 차이로 인하여 요소망의 충분한 세분화를 필요로 한다. 따라서 해의 정확도를 충족시키기 위한 요소망을 결정하기 위하여 여러 경우에 대한 정확도 해석을 하였다. 그림 18에는 사용된 요소망 형태들이 보여진다. 요소망은 C, M, F, VF형으로 갈수록 세분화되며, LF형과 LVF형은 말뚝의 선단과 주변을 중심으로 국부적인 세분화를 한 요소망이다.

이러한 요소망에 대한 말뚝 두부에서의 하중 변위 관계가 그림 19에 나타나 있다. 4절점 요소(CAX4)을 사용한 경우 C형, M형, F형 그리고, VF형과는 다소 차이가 있고, VF형, LF형과 LVF형은 거의 일치하는 결과를 나타내고 있다. 9절점 요소(CAX9)를 적용한 경우에도 하중 변위관계에서도 VF형, LF형, LVF형은 거의 일치하고 있다. 요소망이 세분화될수록 C, M, F, VF형으로 갈수록 주어진 변위에 대하여 말뚝 두부의 하중이 감소하며 LVF형에 수렴하는 경향을 보인다. 가장 세분화된 LVF형 요소망을 기준 해로 볼 때 VF형과 LF형은 해가 정확하다고 여겨진다. 따라서 정확도와 효율성을 고려하여 VF형 요소망에 선형 4절점 표준적분을 채택하였다.

군말뚝으로 이루어진 지반-말뚝계는 하중의 자유도와 무관하게 3차원적인 기하학적 형태를 띤다. 지반-말

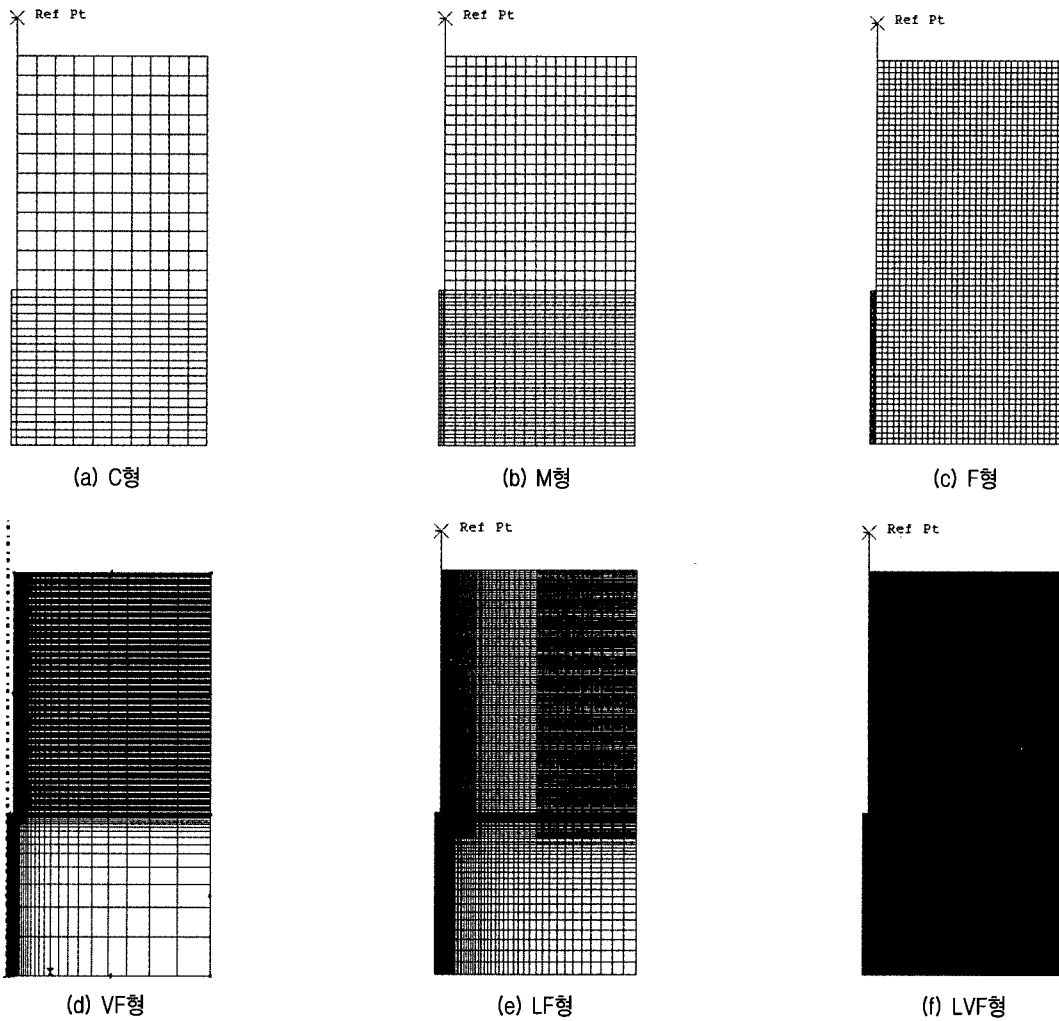


그림 18. 요소망의 세분화

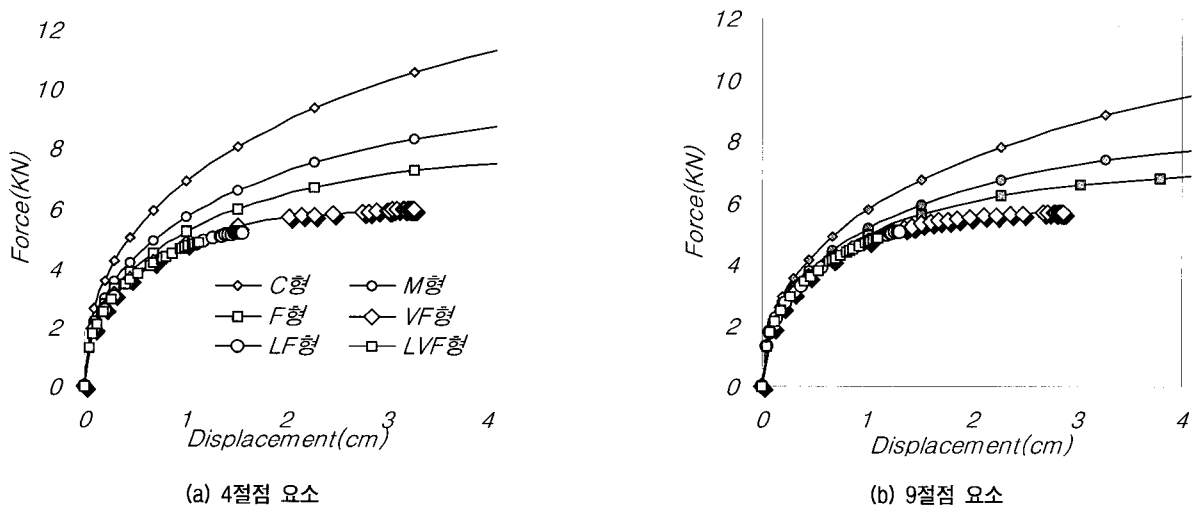


그림 19. 요소망에 따른 하중-변위관계

독계의 3차원 해석을 유한요소해법으로 수행할 경우 정확도에 관련된 문제를 다루기 위하여, 앞에서 수행한 축대칭 조건 단말쪽 해석을 3차원 해석으로 수행하여 비

교하였다. 그림 20에서는 2차원 요소망과 동일한 제원으로 3차원 요소망을 구성하였으며 선형 8절점(C3D8) 요소를 사용하였다. 2차원 축대칭 요소망과의 비교시

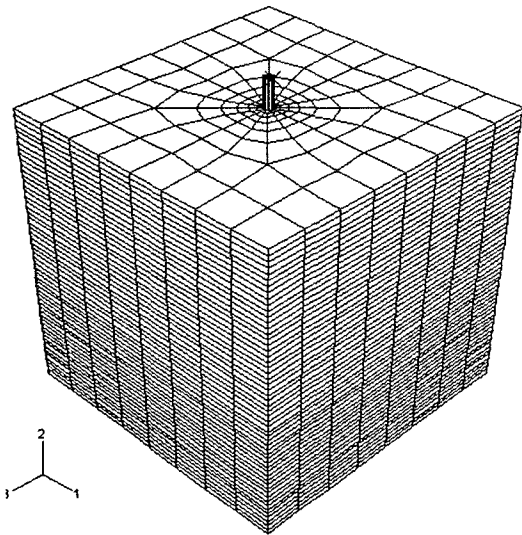


그림 20. 3차원 요소망

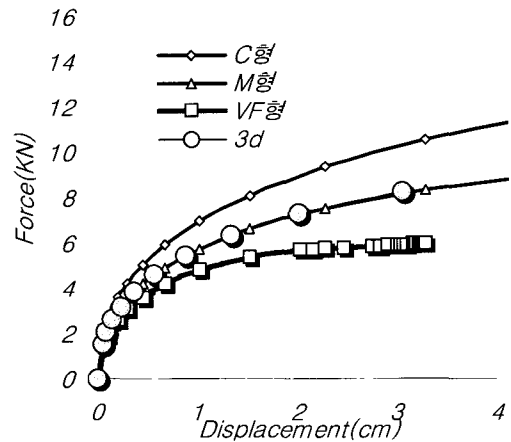


그림 21. 축대칭과 3차원조건의 하중-변위관계

표 6. 요소망에 따른 소요시간(CPU time)\*

요소망 구분	M형	VF형	LF형	LVF형	3차원
CPU time (sec)	29.7	202.5	206.6	303.0	1554.7

\* 마이크로 프로세서 AMD 애슬론 XP1800를 장착한 개인용 컴퓨터를 이용하였으며 Window 2000 환경에서 실행함

M형 요소망에 가장 근접한 요소형태를 가지고 있다.

표 6에서는 말뚝의 변위가 축방향으로 1cm(말뚝지름의 1/6) 발생시의 계산 소요시간(CPU time)을 그림 18의 2차원 요소망 해석시와 비교하였다. 3차원 해석의 경우에는 극단적으로 세분화된 2차원 해석 요소망 LVF 형에 비하여 5배 이상의 소요시간이 필요하다. 실제로 3차원 해석시 계산에 소요된 기간은 5시간 정도였으며(말뚝지름의 2/3 판입시), 최신 개인용 컴퓨터는 계산속도가 중형 컴퓨터에 비하여 뒤지지 않는 것을 감안할 때 더 이상의 요소망 세분화는 곤란한 실정이다.

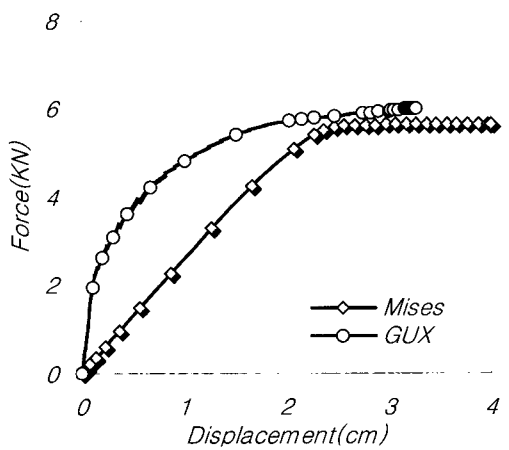
그림 21에 나타난 하중-변위 관계를 보면, 3차원 해석 결과는 2차원 해석시 유사한 정도로 세분화된 M형 해석결과와 유사하게 나타난다. 정확도 해석시 언급한 바와 같이 신뢰할 수 있는 정확도를 가진 VF형 결과에 비하여 정확도가 떨어짐을 알 수 있다. 따라서 지반-말뚝계의 3차원 해석시는 2차원 해석결과와 비교하여 정확도 해석을 수행하는 것이 필요하고, 때로는 계산 환경에 따라 원하는 정확도를 얻지 못하는 경우도 있다.

### 5.3 수치해석결과

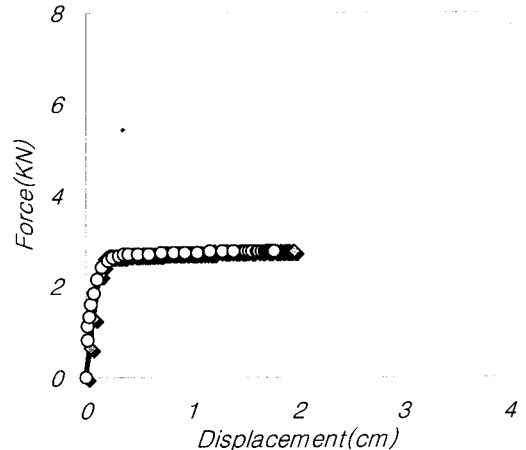
정확도 해석에 따라 결정된 해석모델에 대하여 지반-

말뚝계의 거동을 비교하였다. 그림 22에서는 Mises 모델과 GUX 모델을 적용하여 배수 및 비배수 조건에 따른 말뚝 두부에서의 하중-변위 관계를 보여준다. 비배수 조건은 비배수 삼축압축시험을 통하여 재료계수를 결정하였으며 Poisson 비를 0.4999로 입력하여 설정하였다. 최대 하중은 두 모델이 유사하게 나타났으며 배수 조건시는 축변위가 약 2.2cm일 때 최대하중이 5.9KN이었고, 비배수 조건시는 0.2cm 정도에서 2.7KN이 발생하였다. 그림 17의 응력-변형도 관계를 보면 Mises 모델은 최대응력의 50% 응력에서 결정된 할선 변형계수를 이용하므로 50% 최대응력 이후에는 GUX 모델에 비하여 응력-변형도 계수가 크게 나타난다. 그러나 그림 22(a)에서 보여지듯이 지반-말뚝계의 하중-변위 관계는 GUX 모델이 강성(하중-변위 관계의 기울기)이 크게 계산되었다. 이러한 결과는 응력-변형도 관계의 전반부(50% 최대응력 미만의 응력수준)에서의 거동이 중요한 역할을 한 까닭으로 판단된다.

그림 23에서는 배수 조건시 축변위가 2.1cm일 축차 응력 등고선을 나타내었다. 배수 조건에서는 GUX 모델이 Mises 모델에 비하여 응력수준이 크게 나타났을 뿐 아니라 응력의 집중이 선단부에 많이 일어났다.

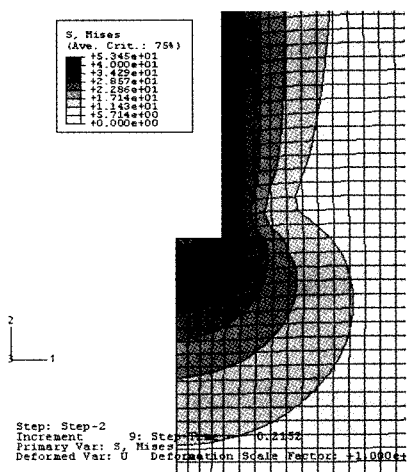


(a) 배수 조건

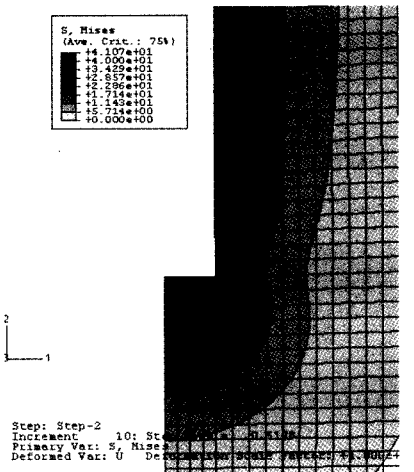


(b) 비배수 조건

그림 22. 하중-변위관계



(a) Gux모델



(b) Mises기준

그림 23. 배수조건시 응력등고선

## 6. 결론

본 연구에서는 동반논문(오세봉, 2002)에서 GUX 모델을 ABAQUS 코드에 대변형도 기하학에 적합하도록 구현한 후, 예제해석을 수행하였다. 그 결과를 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 한 질점에서의 응력-변형도 관계에 대하여 ABAQUS 코드로 정확도 해석을 수행한 결과 동반논문에서의 내재적 응력적분 기법이 해의 정확도를 확보하게 함을 알 수 있었다. 또한 일관된 접선계수를 적용하였으므로 실제 문제를 효율적으로 해석할 수 있었다.
- (2) 연약지반의 급속한 성토시 비배수 안정성 문제를 해석하였다. 대변형 해석의 경우에는 변위를 미소변형

해석에 비하여 작게 계산하였고 기하학적 비선형성으로 인한 오차를 배제할 수 있었다. 또한 성토체 하부지반에서 일어나는 파괴시점이 미소변형 해석의 경우 낮은 성토고에서 계산될 수 있음을 알 수 있었다. 해석 결과 실제 거동을 잘 모델하는 GUX 구성 모델이 연약지반의 침하거동을 합리적으로 예측할 수 있었다.

- (3) 가상적인 풍화토 지반의 안정해석을 자중증가법으로 수행하였다. 대변형 해석을 통하여 기하학적 비선형성을 고려할 수 있었고, 평가한 안전율은 미소변형 해석시에 과소평가되고 있었다. 그리고 배수조건시의 사면의 안전율이 비배수조건보다 다소 크게 나타났다.
- (4) 지반-말뚝계의 축하중 재하거동을 해석하는 경우에

는 요소망의 세분화가 해의 정확도에 큰 영향을 끼쳤다. 응력-변형도 관계의 초반부 변형계수 말뚝 두부의 하중-변위 관계에 영향을 크게 끼치며, GUX 모델의 경우에 강성이 Mises 모델보다 크게 나타났다. 또한 비배수 조건의 경우에는 배수조건에 비하여 두부하중이 낮게 발생하였다.

본 연구에서는 풍화토 지반의 전체 변형률 영역의 응력-변형도 관계가 성토나 지반-말뚝계 거동에 미치는 효과를 확인할 수 있었다. 이러한 연구는 굴착문제와 같이 지반의 초기응력효과가 중요한 인자인 경우에는 적용하기 곤란하다. 따라서 유효응력 개념에 의거한 구성 모델의 연구가 진행중이다.

### 감사의 글

본 연구는 과학재단 2002년도 목적기초 연구과제 “전체 변형률범위( $10^{-4}$ ~10%)에서 풍화토 지반구조물 변형 거동 평가를 위한 실험·해석 통합시스템 연구”의 일부로 재단의 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참고 문헌

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”, *한국지반공학회지*, 제10권 제3호, pp.17-32.
3. 오세봉, 권기철, 김동수, 정순용 (2000), “미소변형률 및 대변형률 조건의 거동에 대한 비등방경화 탄소성 구성모델”, *한국지반공학회지*, 제16권, 제1호, pp.65-73.
4. 오세봉, 이영휘, 안영대(2001), “미소변형률 및 대변형률 조건에서 불교란 풍화토의 구성거동에 관한 연구”, *한국지반공학회 학술발표회 논문집*, pp.139-146.
5. 오세봉 (2002), “비등방경화 구성모델을 이용한 대변형 해석: I. 정식화”, *한국지반공학회지*, 18권 4호.
6. Brand, E. W.(1991), “Predicted and Observed Performance of an Embankment Built to Failure on Soft Clay”, *Geotechnical Engineering*, Vol.22, pp.23-41.
7. Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. (2001) *ABAQUS/Standard User's Manual*, version 6.2.
8. MHA, Malaysian Highway Authority(1989), *Proceedings of the International Symposium on Trial Embankments on Malaysian Marine clays*, Kuala Lumpur, Vol.1
9. 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.

(접수일자 2002. 3. 25, 심사완료일 2002. 8. 12)