

저소성 점토의 수정 Cam-clay 모델 적용성에 관한 연구

A Study on the Applicability of Modified Cam-clay Model in Low Plastic Clays

이 송*¹ Lee, Song

김 태 훈*² Kim, Tae-Hwoon

Abstract

FEM analyses which are based on modified Cam-clay theory have been generally used in such cases as analyses of stability and displacement for embankment construction on soft clays. However, the Modified Cam Clay Model can generate some problems in anisotropic stress conditions of field because the critical state theory has been developed through many laboratory tests in isotropic conditions. Thus, the applicability on the prediction of undrained shear strength and pore water pressure which was based on the critical state theory was evaluated by triaxial tests and numerical analyses in isotropic and anisotropic conditions. Used samples often come out in domestic area, together with general low plastic clays which are showing dilatant behavior in shearing process. They were evaluated by laboratory tests and FEM based on MCCM. From the results of test and numerical analysis, the predictions of undrained strength in low plastic clays well coincided with each other in both isotropic and anisotropic conditions. However, the generation of porewater pressure was often overestimated during undrained shearing in anisotropic conditions. The results can generate the errors in the prediction of stress path of field sites during loading such as construction of embankment on soft clays because the field is subjected to anisotropic conditions during loading.

요 지

국내 서해안 지역에서는 실트질 저소성 점토가 두루 분포하고 있다. 따라서, 저소성 점토를 함유한 연약지반에 지반개량공법에 관련된 여러 해석을 실시할 경우, 일반적으로 수정 Cam-clay 모델을 적용하여 FEM 해석을 수행하고 있다. 하지만, 국내에서는 등방조건에서 개발된 Cam-clay 이론의 특성에 대해서 충분한 검토를 하지 않고 비등방 조건을 갖는 현장을 해석하기 위해 두루 적용하고 있다. 따라서, 본 논문은 실트질 저소성 점토지반에서 수정 Cam-clay 이론을 적용할 경우, 발생하는 문제점들을 고려하기 위해 실내 등방 및 비등방 삼축압축시험을 실시하였으며, 그 결과를 FEM 수치해석을 구성하여 시험결과와 비교·검토하였다. 검토결과 수정 Cam-clay 이론을 적용한 해석치들은 비배수 전단강도를 평가함에 합리적인 결과를 나타냈지만, 하중적용시 발생하는 간극수압을 예측함에 모두 과대 평가를 나타냈다. 특히 비등방 조건에서는 등방조건보다 더욱 큰 차이를 보였다. 이러한 원인은 수정 Cam-clay 이론 자체가 등방조건의 이론인 관계로 등방조건보다 비등방조건에서 과잉간극수압 예측이 과대 평가되는 특징을 보인다고 판단할 수 있다. 또한, 등방조건에서 약간 과대 평가되는 이유는 실트질 저소성 점토가 전단시 시료 팽창에 의한 다일러턴시가 발생하여 간극수압 예측에 전반적인 과대 평가를 유발했음이라 판단된다.

Keywords : Anisotropic undraind strength, Coefficient of porewater pressure, FEM analysis, Low plasticity

*1 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Univ. of Seoul, cyclic@sidae.uos.ac.kr)

*2 서울시립대학교 토목공학과 박사 (Member, Ph.D Dept. of Civil Engrg., Univ. of Seoul)

1. 서론

국내의 연약지반 개량공법은 연약 점토지반 상에 계획된 성토 하중을 재하시킴으로써, 지반의 압밀침하 증진, 잔류침하를 억제, 전단강도 증진 목적의 공법들을 일반적으로 사용하고 있다. 따라서, 연약지반개량 공법시 성토하중을 급속히 재하시키면 지반의 전단응력이 증가되어 전단변형이 심하게 유발되는 축방변형이 발생되거나, 심한 경우 지반의 전단파괴를 유발시킬 수 있다. 따라서, 연약지반상 제방의 거동을 파악하기 위해 Tavenas, Watson 등의 여러 연구자들은 성토공법시 적용시 관측된 현장 계측자료를 바탕으로 연약지반의 거동 연구를 실시해 왔다.

국내의 경우 연약지반상 성토공법시 과도한 지반 변형을 방지하고 적절한 성토고와 방치기간 설정, 제방의 안정성 등을 검토 및 평가하기 위해서 일반적으로 FEM 및 FDM 해석기법들을 이용해 오고 있다. 이러한 해석기법 중 FEM 해석은 Cam-clay 이론과 Wroth(1975)이 제안한 현장응력 결정법 등의 여러 이론을 사용하여 Britto와 Gunn이 개발한 CRISP 프로그램이 대표적이다. 하지만, FEM 해석시 사용되는 Cam-clay 이론은 변위 및 변형률을 평가함에 과대 평가하는 경향성을 갖는다고 Srinivas 등(1991)의 연구자들이 제시한 바 있다.

따라서, 본 논문은 저소성 실트질에 점토를 대상으로 다양한 응력조건에서 MCCM의 적용성 평가를 목적으로 하였다. 이것을 위해 국내 서해안 지역, 특히 소성지수가 작은 실트질 점토를 함유한 지역에서 불교란 시료를 채취하여 실내시험과 수치해석을 실시하였다. 실내시험은 표준압밀시험과 등방 및 비등방 압밀 삼축시험을 총 9회 실시하였으며, 그 시험결과들을 수정 Cam-clay모델의 이론 식으로 먼저 평가하였다. 그 이후 FEM 수치해석 기법을 이용하여 그 적용성을 평가하였다.

2. 실내 시험

일반적으로 등방조건하에 있는 점토 시료를 MCCM 모델로 그 거동을 예측할 경우, 합리적인 변위 및 응력

예측을 제시한다고 여러 연구자들이 제안하였다. 하지만, Cam-clay 이론이 개발 당시 등방조건하의 실내시험 결과들을 이용하여 만들어진 이론이므로, 비등방 조건하에서 변위 및 응력 예측을 적절하게 하는 지는 의문의 여지가 있다. 또한, 국내 서해안 지역에서 많이 관찰되는 소성지수가 10이하인 지역에서 저소성 점토의 적용성을 평가할 필요가 있다.

따라서, 본 연구의 실내시험에서는 등방 및 비등방 조건하에서 수정 Cam-clay모델의 예측치들을 비교하기 위해 표준압밀시험, 등방 및 비등방 삼축시험들을 실시하였다.

2.1 시험 시료 물성치

실내시험에 사용된 시료는 시험위치 2곳에서 각각 심도 5m 위치에서 그림 1과 같은 불려샘플링된 시료를 사용하였으며, 표 1에서 제시된 바와 같이 저소성 실트질 점토이다. 이러한 시료를 대상으로 응력이력 특성에 따른 저소성 점토의 거동을 파악하기 위해 다양한 주응력비, $K = \sigma_3 / \sigma_1$ 와 과압밀비 조건하에서 실내 삼축압축 시험이 실시되었다.

표준압밀시험결과 인접한 두 지역의 시료는 유사한 결과를 보인다. 시료특성은 zone-1이 zone-2보다 큰 과압밀비와 투수성을 보이며, 압축성은 보다 작아 압밀계수는 보다 작게 평가되었다. 이 때 투수계수 및 압밀계수는 선행압밀하중에 대응하는 값들이다.

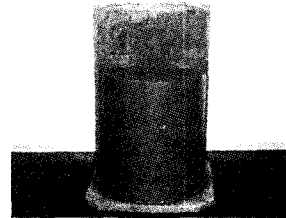


그림 1. 불교란 불려 샘플 ($\phi = 30\text{cm}$)

표 1. 실내시험에 사용된 시료의 토성치

구분	심도 (m)	자연함수비 (%)	액성한계 (%)	소성지수 (%)	압축지수	선행압밀하중 (kgf/cm ²)	수직투수계수 (cm/sec)	수직압밀계수 (cm ² /sec)	흙분류
zone-1	5.0	32.1	27.6	7.5	0.23	1.31	1.54×10^{-7}	5.06×10^{-3}	CL
zone-2	5.0	36.0	30.9	8.0	0.22	0.93	2.75×10^{-7}	4.18×10^{-3}	CL

2.2 비배수 전단시험

삼축시험은 C.K.C type의 장비로 포화시 간극수압계 수, B가 0.98 이상되도록 하였다. 포화후 각각의 압밀 단계별 등방 또는 비등방 압밀을 시킨 후 0.5%/min 속도로 비배수 전단시험을 실시하였다.

등방압밀조건은 zone-2 시료에 대해 2회, 비등방압밀조건은 zone-1은 4회, zone-2는 3회 실시하였다.

2.2.1 등방응력조건

등방압밀시험은 비등방압밀과 비교를 위해 실시하였으며, 그림 2와 같이 과압밀조건과 정규압밀조건에 대해서 각각 실시하였다.

비배수조건에서 전단시 체적변화는 없으므로 체적변형률은 0이 된다. 이것을 수정 Cam-clay 모델에 적용하면 식 (1)과 같다.

$$d\epsilon_v = \frac{1}{v} \left[-\lambda \frac{dp'}{p'} - \frac{(\lambda - \kappa) da}{M} d\eta \right] = 0 \quad (1)$$

식 (1)을 이용하여 경계조건을 주어 적분하였을 때 비배수 유효응력경로는 식 (2)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{p_i}{p'} = \left[\frac{M^2 + \eta_i^2}{M^2 + \eta'^2} \right]^\lambda \quad (2)$$

여기서, p'_i 와 $\eta'_i = (q/p)_i$ 는 초기 유효응력상태를 나타내며, $\lambda = 1 - \kappa / \lambda$ 를 나타낸다.

식 (2)의 비배수 유효응력경로는 p' 와 η 의 변화에 따른 거동을 나타내며, 그림 2에서 보듯 실내 시험결과와 잘 일치하고 있다. 이 때 항복면은 식 (3)과 같다.

$$p'_0 = p' \left(1 + \frac{(q/p')^2}{M^2} \right) \quad (3)$$

결과적으로 정규압밀점토의 비배수 유효응력경로는 항상 항복면 위에서 그 거동을 나타낸다. 반면 과압밀 점토의 경우 p' 가 항복면에 도달할 때까지 일정한 p' 를 유지하면서 q 가 증가되며, 그 이후 정규압밀점토와 같은 비배수 유효응력경로를 따르는 것을 볼 수 있다.

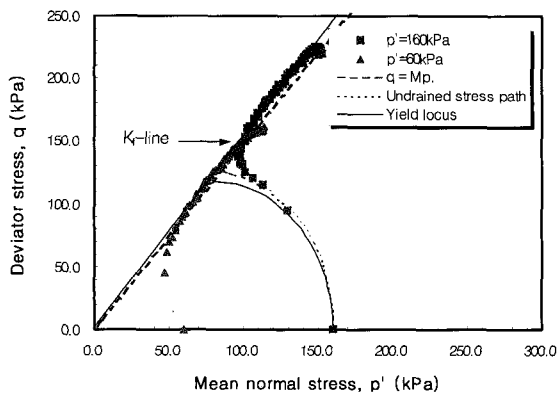
2.2.2 비등방 응력조건

비등방 응력조건은 다양한 토압계수와 유효평균주응력, p' 에서 실시되었다. 실내 시험 결과 비록 K가 서로 다르지만, p' 가 증가함에 따라 비배수 전단강도가 증가함을 볼 수 있었다. 또한, 과압밀비의 증가는 비배수 전단강도의 감소를 나타내었다. 이 때 응력경로는 그림 3과 그림 4에서 나타난 것처럼 초기 항복면에 도달할 때까지는 탄성영역이므로 수직으로 상승한 후 급속히 휘어 항복면을 따르는 거동을 한다.

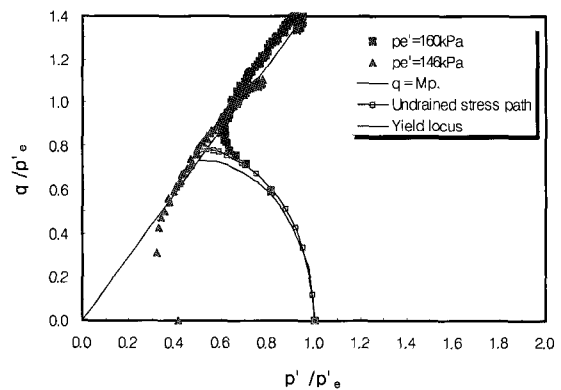
식 (3)에서 항복면의 크기를 결정하는 최대평균주응력, p'_0 는 등방조건과 마찬가지로 탄성변형이후 급속히 응력경로가 파괴면으로 휘기시작하는 시점으로부터 결정할 수 있다. 그 이후 그림 5(a)에서 나타내는 p'_0 와 등가평균유효응력, p'_e 의 관계를 나타낸 식 (4)로부터 현장의 원위치 응력상태를 p' 를 대입하여 p'_e 를 결정할 수 있다.

$$\frac{p'_e}{p'_0} = \left(\frac{p'}{p'_0} \right)^\lambda \quad (4)$$

비등방 압밀조건에서 한계상태시 평균유효응력, p'_{cs}

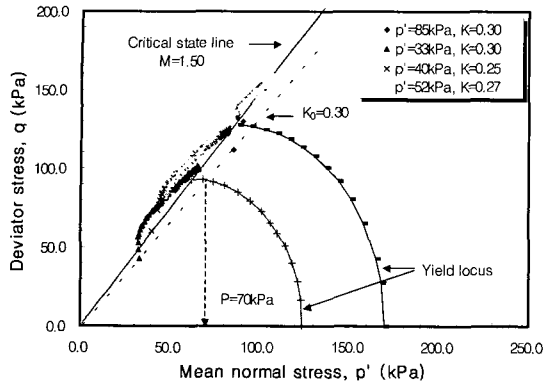


(a) 유효응력경로

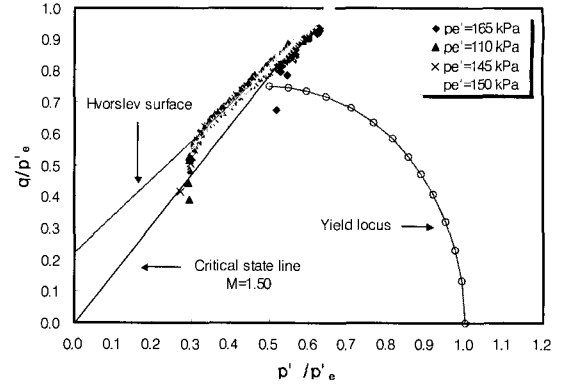


(b) 정규화된 유효응력경로

그림 2. 등방압밀 전단시험 (zone-2)

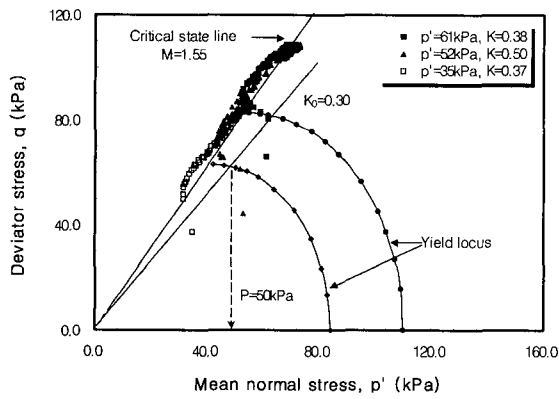


(a) 유효응력경로

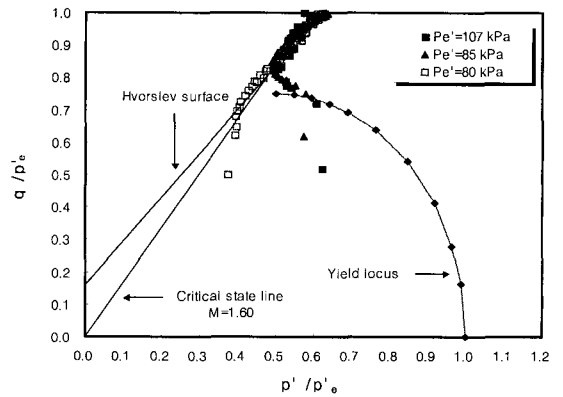


(b) 정규화된 유효응력경로

그림 3. 비등방압밀 전단시험 (zone-1)

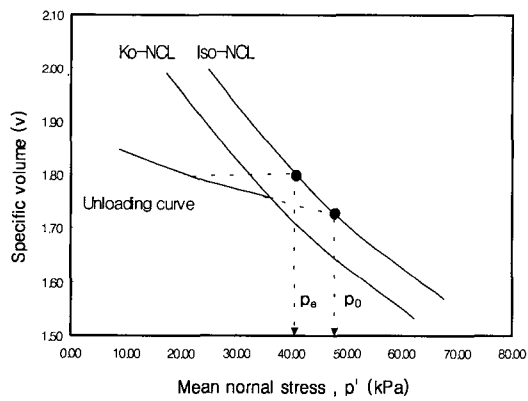


(a) 유효응력경로

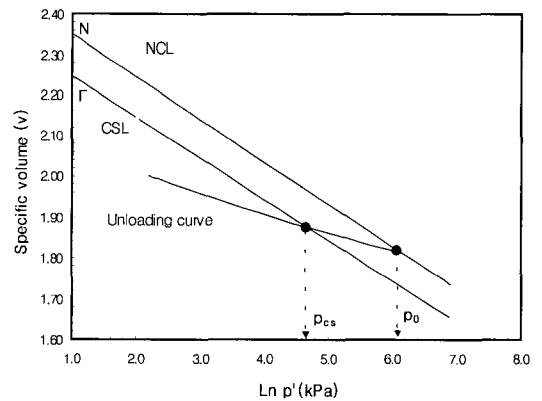


(b) 정규화된 유효응력경로

그림 4. 비등방압밀 전단시험 (zone-2)



(a) p'e와 p'0의 관계



(b) p'cs와 p'0의 관계

그림 5. p'e, p'cs와 p'0의 관계

은 전단응력의 증가없이 소성변형만이 발생되고 체적 변화가 발생되지 않는 시점의 $p'-q$ 좌표계의 응력점 으로부터 결정할 수 있다. 이렇게 결정된 p'_{cs} 를 이용하여 한계상태시 p'_{cs} 와 p'_0 의 비로서 r 를 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$r = \frac{p'_0}{p'_{cs}} = \exp\left(\frac{N-\Gamma}{\lambda-x}\right) \quad (5)$$

그림 5(b)는 한계상태시 p'_{cs} 와 p'_0 의 관계를 나타낸다. 이렇게 결정된 p'_e , p'_{cs} 와 p'_0 를 표 2에서 종합하였다.

표 2. p'_0 , p'_{cs} 와 p'_e 의 결정

	zone-1				zone-2				
	CAU				CAU			CIU	
	test1	test2	test3	test4	test1	test2	test3	test1	test2
$K(= \sigma'_h/\sigma'_v)$	0.30	0.25	0.27	0.30	0.37	0.38	0.50	1.0	1.0
σ'_v (kPa)	60	61	80	90	105	82	57	60	160
p'_i (kPa)	33	40	52	85	35	61	52	60	160
p'_0 (kPa)	124	170	160	182	87	90	114	160	160
p'_e (kPa)	110	150	145	170	80	85	107	148	160
p'_{cs} (kPa)	65	84	105	103	55	68	68	109	149
Peak strength (kPa)	100	120	152	150	83	105	105	158	223

3. 실내시험의 평가

3.1 비배수 전단강도의 평가

등방조건에서 한계상태에 도달되는 비배수 전단강도는 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{S_u}{p'_i} = \frac{M}{2} \left(\frac{p'_0}{p'_i} \cdot \frac{1}{r} \right)^{\lambda} \quad (6)$$

상기 수정 Cam-clay 이론의 식 (6)을 이용하여 비배수 전단강도비, S_u/p'_i 는 예측될 수 있다. 따라서, 본 논문에서 표 2의 시험결과들로부터 결정된 p'_e , p'_{cs} 와 p'_0 으로 비배수 전단강도 예측결과와 실제 전단강도를 p'_i 로 정규화시킨 전단응력비를 결정하여 비교하였다.

실내시험결과 그림 6에서 보듯 등방과압밀비, p'_0/p'_i 에 대한 전단강도비 관계를 나타내는 파라미터 λ 는 log 스케일에서 zone-1와 zone-2 두 시료 모두 거의 일정한 값을 나타내었다.

또한, 식 (6)으로서 결정한 전단강도비와 삼축시험의

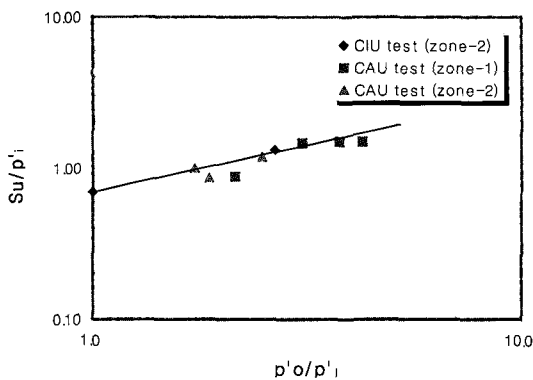


그림 6. 등방 과압밀비에 대한 전단강도비

전단강도를 유효평균주응력으로 정규화시킨 전단강도비를 그림 7에서 비교한 결과 거의 일정한 값을 나타내었다. 여기서, x 좌표축은 실제 파괴시 전단강도를 유효평균주응력으로 정규화시킨 전단강도비를 나타내며, y 좌표축은 식 (6)으로서 결정한 전단강도비이다.

이러한 시험결과를 종합해 볼 때 등방조건이나 비등방조건 모두에서 수정 Cam-clay의 이론으로 예측한 전단강도비는 실제 시험결과와 잘 일치되고 있었다. 즉, 비배수 전단강도의 예측면에서 수정 Cam-clay은 매우 우수하다고 판단될 수 있다.

3.2 파괴시 간극수압의 평가

비배수 전단시험에서 파괴시 과잉간극수압은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\Delta u_f = p'_i \left[1 + M \left(\frac{p'_0}{p'_i} / \frac{p'_0}{p'_{cs}} \right)^{\lambda} \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{M} \right) \right] \quad (7)$$

이 때 발생하는 과잉간극수압의 변화는 식 (8)과 같이

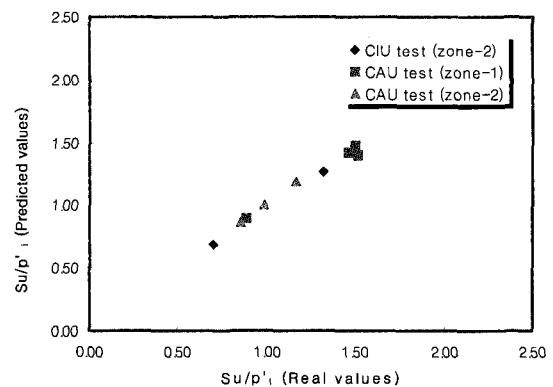


그림 7. 실제와 예측된 강도비 비교

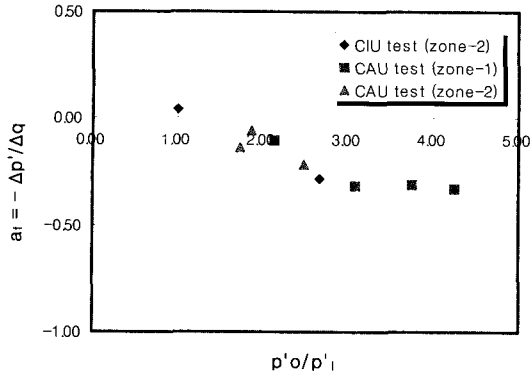


그림 8. 파괴시 간극수압계수와 과압밀비의 관계

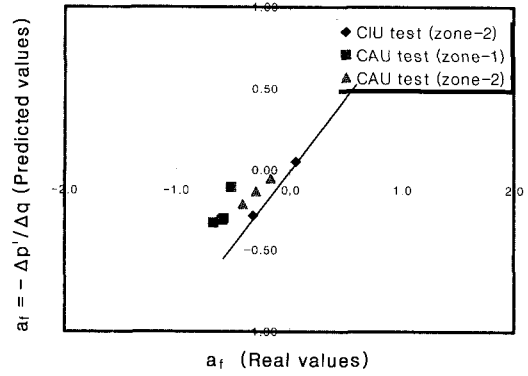


그림 9. 실내시험값과 예측된 간극수압계수의 비교

시료에 적용된 전응력 변화와 같게 된다.

$$\Delta u = \Delta p + a \cdot \Delta q \quad (8)$$

여기서, 평균적인 a 파라미터는 비배수 재하동안 유효 응력경로의 평균 기울기로서 정의될 수 있으며, 한계상태 시료의 체적변화는 없으므로 a 파라미터는 식 (9)로서 나타낼 수 있다.

$$a_r = -\frac{\Delta p'}{\Delta q} \quad (9)$$

식 (7)을 식 (9)로 정의된 간극수압 파라미터를 이용하여 다시 정리하면 식 (10)과 같이 된다.

$$a_r = \left[\left(\frac{p'_o}{p'_i} \cdot \frac{1}{r} \right)^{-\lambda} - 1 \right] / M \quad (10)$$

식 (9)의 간극수압계수는 Skempton의 간극수압계수 A_r 와 매우 유사하며, 등방 과압밀비, p'_o/p'_i 와의 관계가 그림 8과 같다. 여기서, 과압밀비가 증가함에 따라 간극수압계수가 감소하는 것을 볼 수 있다.

전단강도비와 마찬가지로 수정 Cam-clay 이론으로

예측된 파괴시 간극수압비와 실제 실내시험결과의 간극수압비를 비교한 결과가 그림 9에 제시되어 있다. 여기서, x 좌표축은 실제 실내시험결과시 식 (9)로서 산출한 간극수압비이며, y 좌표축은 식 (10)의 수정 Cam-clay 이론으로 예측된 파괴시 간극수압비이다.

상기의 결과를 종합해 볼 때 파괴시 간극수압은 모두 과대 평가되는 것을 볼 수 있다. 즉, 등방조건일 경우 실제와 예측치가 유사하지만, 비등방조건일 경우 그 차이가 큼을 볼 수 있다.

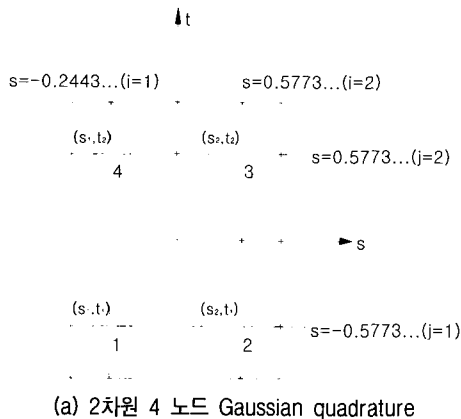
4. 수치해석

4.1 구성관계

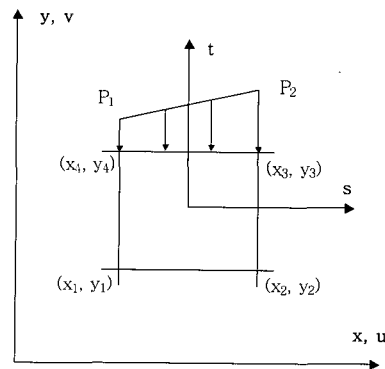
본 연구에서는 수정 Cam-clay 모델의 적용성을 검토하기 위해 다음과 같이 탄·소성 모델을 이용하여 프로그램 개발했으며, 실내시험결과와 비교·검토하였다.

먼저, 삼축시험의 Geometry를 구성은 그림 10과 같이 사각형 4 노드 요소망을 이용하였다.

구성 모델은 수정 Cam-clay 이론을 적용한 탄·소성



(a) 2차원 4 노드 Gaussian quadrature



(b) x-y 좌표계상 하중

그림 10. Isoparametric 4 노드 사각형 요소

모델을 이용하였으며, 그 구성관계는 식 (11)과 같다.

$$[D_{ep}] = [D_e] \left[1 - \frac{\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma} \right) \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma} \right)^T [D_e]}{A + \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma} \right)^T [D_e] \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma} \right)} \right] \quad (11)$$

여기서, $\frac{\partial F}{\partial \sigma_i}$ 는 flow matrix로 식 (12)와 같고, A는 hardening parameter로 식 (13)과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial F}{\partial \sigma_1} \\ \frac{\partial F}{\partial \sigma_2} \\ \frac{\partial F}{\partial \tau_{12}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \left(\frac{4M^2}{2p'^2(M^2 + \eta^2)^2} \right) [p' \eta^2 + 3p'M^2 - 9(\sigma_1 - p')] \\ \left(\frac{4M^2}{2p'^2(M^2 + \eta^2)^2} \right) [p' \eta^2 + 3p'M^2 - 9(\sigma_2 - p')] \\ \left(\frac{24M^2}{p'^2(M^2 + \eta^2)^3} \right) \times \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

$$A = \frac{(1+e)}{p'(\lambda-k)} \left[\frac{16M^4(M^2 - \eta^2)}{(M^2 + \eta^2)^3} \right] \quad (13)$$

상기의 Geometry 조건과 구성관계를 이용하여 강성 매트릭스 [K]를 각 요소마다 결정하고, 또한 각 요소에 작용하는 표면하중과 지중 등의 외부하중이 내부 유발 응력과 평형조건을

나타내는 식 (14)로 FEM 수치해석을 구성하였다. 이에 대한 프로그램의 절차는 그림 11과 같다.

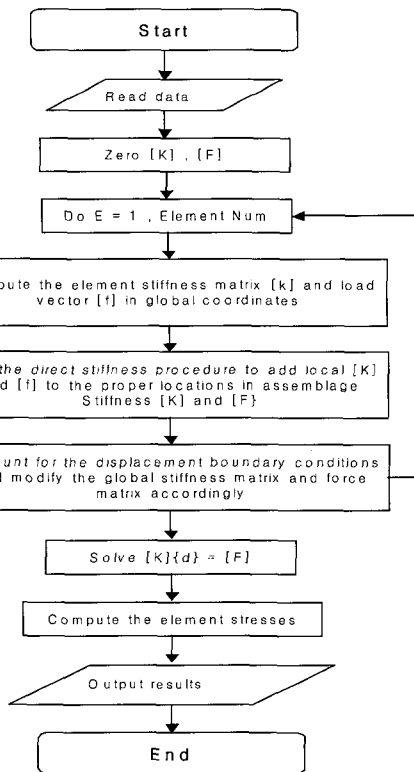


그림 11. FEM 수치해석의 구성 절차

$$\begin{aligned} \{f\} &= \int_V [B]^T [D] [B] dV \{d\} \\ &= \int_V [N]^T \{f^B\} dV + \sum_i R_c^i + \int_{S_i} [N]^T \{f^S_i\} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, [N]는 shape function이며, [B]는 변형률 매트릭스, [D] 응력-변형률 구성관계 매트릭스, f^B 는 작용 자중, R_c^i 는 초기하중, $\{f^S_i\}$ 는 작용 표면하중을 나타낸다.

강성매트릭스 [K]는 식 (15)와 같다.

$$[K] = \int_A \int [B]^T [D] [B] t dx dy \quad (15)$$

4.2 모델링 및 경계조건

4.1절의 수치해석 방법을 적용하여 그림 12의 변위 경계조건을 갖는 삼축시험의 압밀과정과 전단과정을 실시하였다. 압밀조건은 배수조건으로 등방 및 비등방 압밀과정을 모델링하였으며, 전단과정은 비배수조건으로 파괴과정까지를 모델링하였다.

즉, 일정한 토압계수에 맞추어 수직응력과 수평응력이 압밀과정에 맞추어 적용된 후, 전단시 수평응력은 변화없이 수직 압축이 발생하는 삼축시험과 같이 수직응력을 증가시켜 해석을 실시하였다.

모델링은 원시료 직경 5cm, 높이 10cm의 공시체를 1/4로 나눈 모양에서 오른쪽 하부를 선택하여 왼쪽의 경계부는 x좌표가 고정된 롤러로, 하부 경계부는 y축이 고정된 롤러 구조로 경계조건을 설정하였다. 이 때 하부 왼쪽 끝 부분은 x, y축이 모두 고정된 경계조건을 갖는다.

4.3 해석 결과분석

본 논문은 상기의 과정으로 프로그램을 개발하였다.

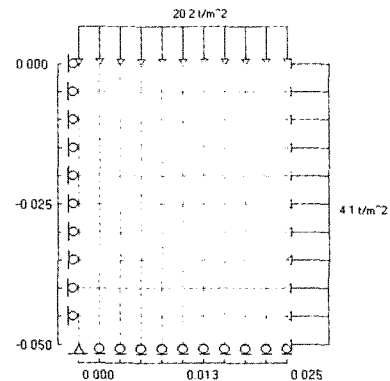
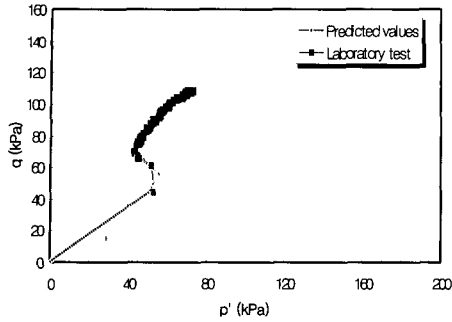
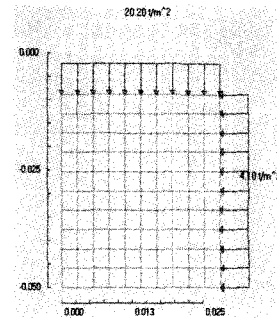


그림 12. 삼축압축시험의 모델링



(a) 해석결과의 응력경로(zone-2 CAU2)



(b) 시료 파괴시의 변형

그림 13. 구성된 FEM 수치해석의 결과들

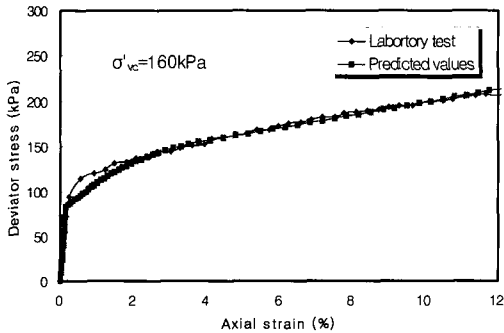
이에 개발된 프로그램은 실내 삼축압축시험을 모델링하여 압밀하중과 그 이후 비배수 조건의 전단하중을 적용한 결과를 각 노드 및 요소별 응력 및 변위를 반복계산 저장하여 수치해석 결과부에 그림 13과 같이 제시하도록 하였다. 그림 13(a)는 삼축압축시험이후 얻게 되는 해석결과중 일부를 실내시험과 비교한 것이며, 그림 13(b)는 시료 파괴시 변형을 나타내고 있다.

이러한 결과들로부터 얻는 수치해석값과 삼축압축시험으로부터 결정된 값들을 비교하여 본 연구에서 사용

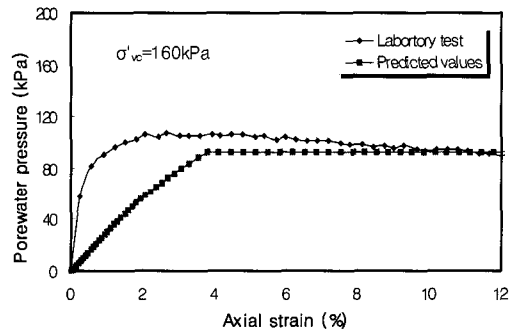
된, 소성지수가 10이하의 저소성 실트질 점토에서 수정 Cam-clay 모델의 적용성을 분석하였다.

4.3.1 등방 압밀 전단시험

등방 삼축시험의 경우 그림 7에서 파괴시 예측 전단강도비와 실험 값이 거의 동일했던 바와 같이 수치해석을 통해 결정한 축차응력-변형률 관계는 그림 14(a)와 그림 15(a) 같이 유사한 값을 나타냈다. 하지만, 그림 14(b)와 그림 15(b)에서 비배수 전단시 과잉간극수압은

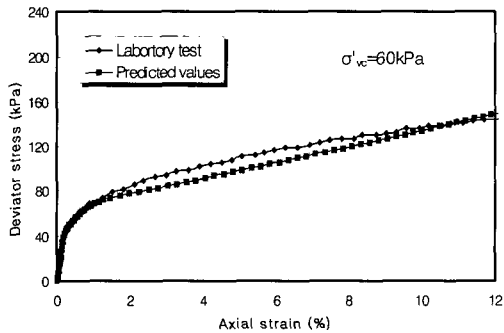


(a) 축차응력 - 변형률 곡선

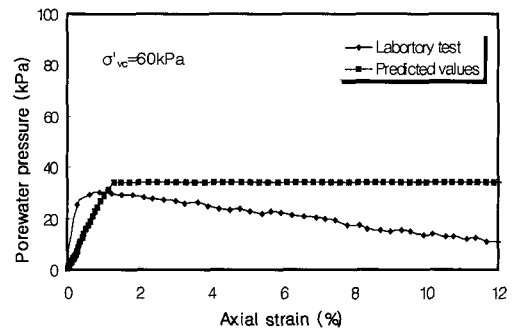


(b) 과잉간극수압 - 변형률 곡선

그림 14. 등방압밀 삼축시험에서 Cam-clay 모델의 적용성 (zone2 등방삼축시험 1)



(a) 축차응력 - 변형률 곡선



(b) 과잉간극수압 - 변형률 곡선

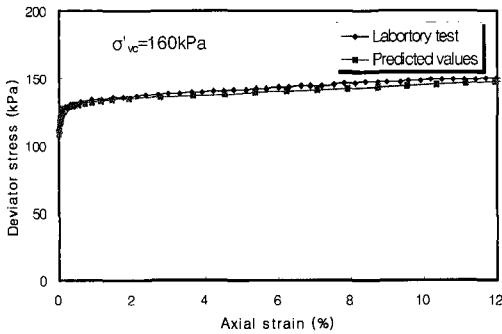
그림 15. 등방압밀 삼축시험에서 Cam-clay 모델의 적용성 (zone2 등방삼축시험 2)

실제 변형률-간극수압 곡선과 비교해 볼 때 최대 간극수압이 발생하는 변형률은 증가되며, 시료의 변형이 10% 이상 상당히 커질 경우 예측 간극수압은 과대 평가되었다. 즉, 한계상태시와 같이 대 변형이 발생할 때 간극수압은 실제 보다 과대 평가되고 있었다.

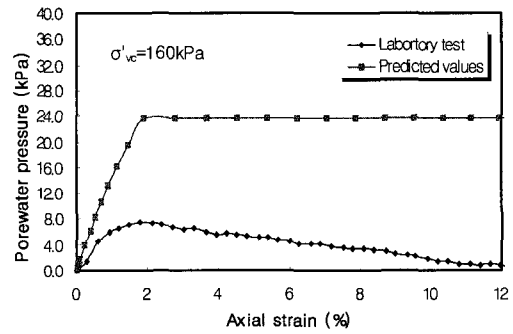
본 연구에서 사용한 샘플은 소성지수가 10 이하의 실트질 점토로 축변형률-축차응력 곡선이 변형률 연화 현상이 발생하는 시료가 아니라 변형률 경화 현상이 발생하는 시료이므로, 축변형률-축차응력 곡선의 개형을 어느 정도 예측하는데 수정 Cam-clay 이론을 이용한 탄·소성 모델이 비교적 잘 일치한다고 판단될 수 있다. 하지만, 간극수압을 예측함에 과압밀비가 높거나, 실트질 함량이 많아 다일러턴스가 발생하는 시료의 경우 파괴 시 과잉간극수압은 과대평가하는 경향성을 나타내고 있다.

4.3.2 비등방 압밀 전단시험

압밀과정을 배수조건으로 비등방 하중을 적용한 후 등방압밀 시험과 마찬가지로 비배수 조건에서 축차응력을 적용하는 일련의 과정을 수치해석에 적용하였다.

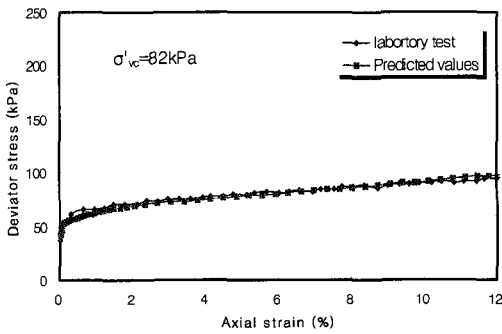


(a) 축차응력 - 변형률 곡선

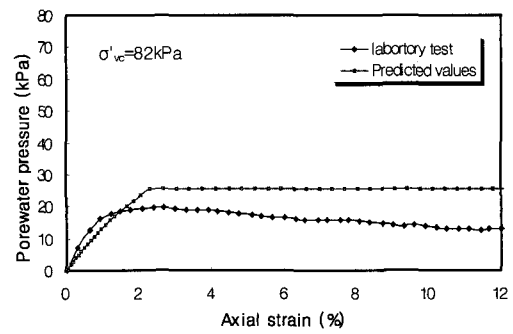


(b) 과잉간극수압 - 변형률 곡선

그림 16. 비등방압밀 삼축시험에서 Cam-clay 모델의 적용성 (zone-1 비등방삼축시험 4)



(a) 축차응력 - 변형률 곡선



(b) 과잉간극수압 - 변형률 곡선

그림 17. 비등방압밀 삼축시험에서 수정 Cam-clay 모델의 적용성 (zone-2 비등방삼축시험 2)

수치해석으로부터 결정된 값을 검토하기 위해 대표적인 결과 값을 그림 16과 그림 17에 제시하였다. 그림 16(a)와 그림 17(a)의 축차응력-변형률 곡선은 그림 7에서 제시했던 바와 같이, 본 시험에서 사용된 변형률 경화 현상을 보이는 저소성 실트질 점토에서는 등방압밀과 비등방압밀 전단시험에서 전단강도의 평가에서 있어 수정 Cam-clay 이론이 비교적 정확한 예측을 하고 있다. 하지만, 그림 16(b)와 그림 17(b)의 전단시 과잉간극수압 결과는 그림 9와 같이 비등방조건이 등방조건보다 과대평가하고 있는 경향을 나타내고 있었다.

이것은 비등방 응력조건을 갖는 현장에서 다일러턴시를 보이는 재료를 갖는다면, 급속성토와 같은 비배수 조건에서 수정 Cam-clay 이론을 적용할 때 현장의 과잉간극수압을 크게 예측할 수 있음을 시사한다.

5. 결론

본 논문에서는 수정 Cam-clay 이론으로 소성지수가 10이하인 저소성 실트질 점토의 거동을 예측함에 그 특징을 살펴보았다. 이를 위해 등방 및 비등방 압밀 삼축

압축시험을 실시하여 비배수 전단시 전단강도비와 과잉간극수압을 평가하였고, 다음으로 수정 Cam-clay 이론으로 탄·소성 모델을 구성한 수치해석결과와 실내 시험결과를 비교하였다. 평가결과는 다음과 같다.

- (1) 삼축시험결과들을 수정 Cam-clay 식으로 비교한 결과, 등방 및 비등방 조건에 상관없이 전단강도비는 예측치와 실제 시험치가 유사함을 나타내었다. 하지만, 전단시 발생하는 과잉간극수압비는 등방조건에서는 실제 시험값과 예측치가 유사했지만, 비등방압밀조건에서는 모두 실험값에 비해 크게 과대 평가되었다.
- (2) 수치해석결과들을 삼축시험과 비교한 결과, 등방 및 비등방 압밀후 수직응력-변형률면에서 유사한 거동을 나타내었다. 이는 저소성 실트질 점토와 같이 응력-변형률 곡선이 변형률 경화현상을 보이는 시료에 있어 수정 Cam-clay 모델이 매우 합리적인 결과를 산출한다고 판단될 수 있다. 하지만, 하중적용시 간극수압의 예측면에서 저소성 실트질 점토는 비교적 작은 구속압하의 N.C 또는 O.C 조건 모두에서 다일러턴시에 의한 변형률 연화 현상을 나타내므로 예측값들이 항상 큰 값을 나타내게 된다. 즉, 이러한 수치해석결과는 삼축시험과 수정 Cam-clay의 이론식으로 산출한 결과와 같은 경향을 나타내었다.

결국, 수정 Cam-clay이론은 초기 등방조건들의 시험 결과 들로부터 개발된 모델이므로 비등방 조건의 해석 시 시료의 강성예측은 비교적 일치될 수 있겠지만 전단시 발생하는 과잉간극수압 예측은 과대평가 된다. 특히, 사용재료가 저소성 점토 또는 과압밀비가 비교적 큼으로써 다일러턴시 현상이 발생될 경우에는 등방 압밀조건의 과잉간극수압에서도 과대평가 될 수 있다.

따라서, 이러한 결과들을 종합해 볼 때 저소성 실트질

점토를 갖는 현장지반 조건에서 강도 및 변위 예측은 수정 Cam-clay 모델이 우수하다고 판단할 수 있다. 하지만, 성토 재하시 하중 증가에 의해 연약 점토지반이 파괴영역을 향해 다가서는 응력경로를 경험할 때, 현장 지반의 간극수압을 예측함에 있어서는 수정 Cam-clay 모델이 간극수압을 실제보다 과대 평가할 우려가 있음을 시사한다.

앞으로 과제는 다양한 현장에서 수정 Cam-clay 이론을 적용하여 현장 계측 치와 해석치를 비교한 결과들이 많이 있지만 저소성 지역의 경우 충분한 자료가 없으므로 국내 서해안 지역과 같은 지역에서 현장자료들과 해석결과들을 비교하여 현장 적용성을 다시 한번 검토해야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Britto, A. M., and Gunn, M. J.(1987), *Critical state soil mechanics via finite elements*, Ellis Horwood Limited.
2. Donaghe, R. T., and Townsend, F. C.(1978), "Effects of anisotropic versus isotropic consolidation in consolidated undrained compression tests of cohesive soils", *Geotechnical Testing Journal*, GTJODY, Vol.1, No.4, Dec, pp.173-189.
3. Mayne, P. W.(1980), "Cam-clay prediction of undrained strength", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Proceeding of ASCE, Vol. 106, No.GT11, November, pp.1219-1243.
4. Srinivasa, B. R., Vatsla, A., Nagaraj, T. S.(1991), "Revised Cam-Clay Model", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.117, No.6, pp.851-871, June.
5. Tavenas, F., Blanchet, R., Garneau, R., Leroueil, S.(1978), "The stability of stage-constructed embankments on the soft clays", *Can. Geotech. J.*, No.15, pp.283-305.
6. Watson, G. H., Crooks, J. H. A., and Yam, C. C.(1984), "Performance of preloaded and stage-loaded structures on soft soils in Trinidad", *Geotech.* 34, No.2, pp.239-257.
7. Wroth, C. P.(1975), "In-situ measurement of initial stresses and deformation characteristics", in *Proc. Specialty Conf. on In-Situ Measurement of Soil properties*, Raleigh, North Carolina, Vol.2, pp.181-230.

(접수일자 2003. 4. 2, 심사완료일 2003. 7. 20)