한국지반공학회논문집 제23권 1호 2007년 1월 pp. 67 ~ 76

대변형을 고려한 flat DMT의 3차원 관입 해석

An Analysis of Flat DMT Penetration Based on a Large Strain Formulation

변 위 용[1] Byeon, Wi-Yong
이 승 래[2] Lee, Seung-Rae

Abstract

Flat DMT penetration was analyzed using a finite element model based on a large strain formulation. The ABAQUS/Explicit, a commercial finite element method, was used to study the flat DMT penetration in soils. Then, because the very large mesh distortion occurred due to the penetration of flat DMT, the adaptive meshing technique was utilized to maintain a high quality mesh configuration. The undrained shear strength obtained from the flat DMT is estimated using only the horizontal stress index (K_D) and so it became necessary to examine using the analysis results obtained from the penetration of the flat DMT. Analysis results show that in normally consolidated region of K_D=2, the results obtained from the correlations proposed by Marchetti show good agreement with those estimated from the finite element method. The present analysis also shows that in overconsolidated region of K_D>2, the results obtained from the relationships proposed by Kamei and Iwasaki show good agreement with those provided by the penetration analysis.

요 지

대변형을 고려한 유한요소법을 이용하여 flat DMT의 3차원 관입을 모사하였다. 상용 프로그램으로 널리 알려진 ABAQUS/Explicit를 이용하여 flat DMT의 3차원 관입 해석을 수행하였으며 관입 도중에 발생되는 큰 요소 변형을 해결하기 위하여 adaptive meshing 기법을 도입하였다. 해석 결과를 바탕으로, flat DMT 시험방법으로부터 얻어지는 3가지 지수 중에 하나인 수평응력지수(K_D)와 지반 설계 정수인 비배수 전단강도 간의 관계를 살펴보았다. 그 결과 K_D=2인 정규압밀지반에서는 Marchetti(1980)가 제안한 경험적 상관관계식과, K_D가 2이상으로 모사되는 과압밀지반에서는 Kamei & Iwasaki(1995)가 제안한 경험적 상관관계식과 잘 일치하는 결과를 제공하였다.

Keywords : Flat dilatometer test (DMT), Finite element method, Penetration, Undrained shear strength

1. 서 론

Flat DMT는 Marchetti(1980)에 의해 처음 제안된 현장 시험방법으로 매우 신속하고 간편하며 경제적으로 시험을 수행할 수 있을 뿐 아니라 시험자에 거의 상관없이 매우 신뢰성 있는 결과를 제공하는 장점을 가지고 있다. Flat DMT 결과는 Marchetti에 의해 제안된 3가지 중간지수(I_D, K_D, E_D)에 의해 해석이 이루어지며 많은 연구자들에 의해 이들 지수들을 이용하여 지반 설계변수들을 예측하는 상관관계식들이 제안되었다. 특히 비배수

1 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연수 연구원 (Member, Post-Doc, Dept. of Civil & Environmental Engineering, KAIST, dyuran@hanmail.net, 교신저자)
2 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., KAIST)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

전단강도의 경우 flat DMT 시험에 의해 가장 신뢰성 있고 유용하게 추정할 수 있는 지반 설계변수값으로 알려져 있다(Marchetti, 2001).

Flat DMT로부터 비배수 전단강도를 추정하는 기존에 제안된 경험적 상관관계식들은 Marchetti가 처음 제안한 수평응력지수(K_D)와 비배수 전단강도 간의 관계를 이용하는 방법으로 많은 연구자들이 이를 토대로 각기 다른 대상 지반에서 수행된 결과로부터 수정된 경험적인 상관관계식을 제안하였다.

Flat DMT를 포함한 대부분의 현장 시험들은 관입으로 인하여 큰 소성변형을 내포하고 있음에도 불구하고 현장 시험 동안에 측정된 자료들과 지반 물성들간의 관계로부터 다양한 설계변수들을 추정하고 있다. 이러한 현장 시험을 모사하고자 할 때 대상 문제가 아주 복잡하기 때문에 수치해석적인 방법으로부터 대략적인 해를 구할 수 있다. 많은 연구자들에 의하여 적용된 수치해석적인 방법들은 지반 공학분야에서 아주 유용하게 사용되어 왔으며 개발되어 왔다. 이 중에서 유한요소법은 쉽게 다양한 구성모델들을 이용할 수 있으며 복잡한 형상을 갖는 문제를 풀 수 있고 높은 정확도를 제공할 수 있다.

본 연구에서는 flat DMT로부터 비배수 전단강도를 추정하기 위하여 K_D와 비배수 전단강도를 이용하는 방법에 대하여 살펴보았다. Flat DMT를 포함한 현장 시험 방법의 경우 관입을 통하여 측정된 값과 설계변수 간의 관계를 도출하기 때문에 K_D와 비배수 전단강도 간의 관계를 살펴보기 위하여 수치해석을 이용한 flat DMT의 관입을 모사해야 한다. 따라서 상용프로그램으로 널리 알려진 유한요소 프로그램인 ABAQUS/Explicit를 이용하여 flat DMT의 3차원 관입 해석을 수행하였으며 flat DMT로부터 구하는 K_D와 비배수 전단강도 간의 관계를 수치해석 결과와 비교 검토하였다.

2. Flat DMT에서의 비배수 전단강도

Marchetti(1980)는 제안한 3가지 중간지수(식 (1))를 이용하여 flat DMT로부터 지반의 여러 설계변수들을 예측하는 상관관계식을 제안하였다. 특히 flat DMT로부터 구할 수 있는 여러 설계변수들 중에 하나인 비배수 전단강도는 Marchetti(1980)에 의해 처음 제안되었으며 OCR과 flat DMT로부터 구한 K_D 간의 경험적 상관관계식(식 (2))과 Ladd 등(1977)이 제안한 식(식 (3))을 기초로 해서 처음 제안되었다(식 (4)). 또한 $(s_u/\sigma'_{v0})_{NC}$는 Mesri(1975)가 현장베인시험 결과로부터 제안한 0.22를 사용하였다.

$$I_D = (p_1 - p_0)/(p_0 - u_0) \tag{1a}$$

$$K_D = (p_0 - u_0)/\sigma'_{v0} \tag{1b}$$

$$E_D = 34.7(p_1 - p_0) \tag{1c}$$

여기서, I_D는 재료지수, K_D는 수평응력지수, E_D는 dilatometer modulus, u_0는 관입 전 현장지반의 간극수압, p_0는 초기 접촉압력, p_1은 1.1mm 팽창 압력, σ'_{v0}는 연직유효응력이다. 그리고 이들 계수로부터 추정되는 OCR 값과 비배수 전단강도 상관관계식은 다음과 같다(Marchetti, 1980).

$$OCR = (0.5K_D)^{1.56} \tag{2}$$

$$(s_u/\sigma'_{v0})_{OC} = (s_u/\sigma'_{v0})_{NC}\, OCR^{0.8} \tag{3}$$

$$s_u = 0.22\sigma'_{v0}(0.5K_D)^{1.25} \tag{4}$$

한편 Kamei & Iwasaki(1995)는 일본 지역에서 수행한 시험 자료들을 활용하여 다음의 수정된 비배수 전단강도식을 제안하였다.

$$s_u = 0.35\sigma'_{v0}\,(0.47K_D)^{1.14} \tag{5}$$

3. 관입 모사에 적용된 해석 기법

압출(extrusion), forging, rolling, metal forming 그리고 관입과 같은 문제들은 해석 과정에서 매우 큰 요소 변형을 유발하며 이를 해결하기 위하여 다음의 두 가지 기법들이 개발되었다. 하나는 arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) 수식화이고 다른 해석 기법은 adaptive remeshing 기법이 적용된 Lagrangian 수식화이다.

ALE 기법은 공간상에 고정되어 있도록 제한 받지도 않고 물체 내부의 절점들과 같이 움직이도록 구속되지도 않는 기준계를 도입하여 유한요소의 움직임을 사용자의 의도대로 제어할 수 있도록 한 해석법으로 과도한 요소 변형을 피할 수 있다. 다른 방법은 Lagrangian 수식화를 사용하며 요소가 변형할 때 adaptive remeshing 기법을 사용하는 것이다. Hamel 등(2000)은 매개 변수들에 매우 의존적이고 접촉면(contact interface)이 복잡한 문제에 대하여 adaptive remeshing 기법이 매우 큰 장점을 갖고 있다고 하였다. 본 논문에서는 ABAQUS/Explicit에서 adaptive meshing 기법을 도입한 Lagrangian 수식화를 이용하여 3차원 관입 해석을 수행하였다.

3.1 ABAQUS/Explicit에서의 유사정적해석(quasi-static analysis)

Explicit 해석 방법은 복잡한 문제의 경우에 implicit 해의 비효율성을 해결하기 위하여 개발되었다. Sun 등(2000)은 동적인 문제(dynamic problems)에 대하여 implicit와 explicit 방법들을 비교하였으며 Rebelo 등(1992)은 explicit 방법이 비연속성이고 비선형성을 갖는 복잡한 문제에 적합하다고 서술하였다. 매우 복잡한 문제의 경우 implicit 방법은 시간 증분이 감소함에 따라 해석 비용이 급격하게 증가하게 되고 분산을 야기할 수 있다(Sun 등, 2000). 그러나 explicit 방법의 경우 시간 증분의 크기는 대상 문제의 복잡성에 의해 결정되는 것이 아니라 element dimension과 재료 성질에만 의존하게 되고 따라서 일반적으로 복잡한 접촉 조건에 의해 영향을 받지 않는다(Hibbit 등, 2005).

Explicit dynamics 해석 과정에서는 lumped element mass matrices를 사용하며 물체의 움직임을 나타내는 식은 explicit central-difference integration rule을 적용한다(Hibbit 등, 2005).

$$\dot{u}_{(i+1/2)} = \dot{u}_{(i-1/2)} + \frac{\Delta t_{(i+1)} + \Delta t_{(i)}}{2} \ddot{u}_{(i)} \tag{6a}$$

$$u_{(i+1)} = u_{(i)} + \Delta t_{(i+1)} \dot{u}_{(i+1/2)} \tag{6b}$$

여기서 i는 increment number, u는 변위, 그리고 Δt는 시간증분이다.

3.2 Adaptive Meshing 기법

Adaptive meshing 기법은 관입이 진행되는 동안 요소의 모양을 유지하며 정확한 해석을 수행하고 수렴을 유지할 수 있도록 사용된다. Adaptive meshing 기법은 크게 smooth한 요소를 생성하고 advection sweep으로 불리는 예전 요소에서 새로 생성된 요소로 해석 값(solution variables)들을 다시 재구성(remapping)하는 과정으로 나누어진다.

기본적으로 요소를 smoothing하는 방법은 3가지 방법이 있으며 Laplacian 방법, Weighted area 방법, 그리고 Equipotential 방법이 있다. Smoothing 방법은 각 반복과정(iteration)중에 절점들의 움직임이 수렴 거리(convergence distance) 또는 최대 반복 수를 만족할 때까지 반복적으로 절점들을 움직임으로써 요소의 품질(quality)을 개선하는 방법이다.

Laplacian 방법은 한 절점이 이웃한 절점들의 중앙에 위치하는 것으로 이웃한 절점들의 좌표를 직접적으로 평균하여 절점을 재배치하는 것이다. 그림 1(a)와 같이 $(x, y)_0$의 위치는 절점 1, 2, 3, 4 또는 5, 6, 7, 8에 따라 결정되며 요소의 비틀림(distortion)을 감소시키기 위하여 식 (7)로 표현되는 이동벡터(movement vector)에 따라 이동한다.

$$\Delta V_L = \frac{1}{nnode} \Sigma_{i=1}^{nnode} V_1 \tag{7}$$

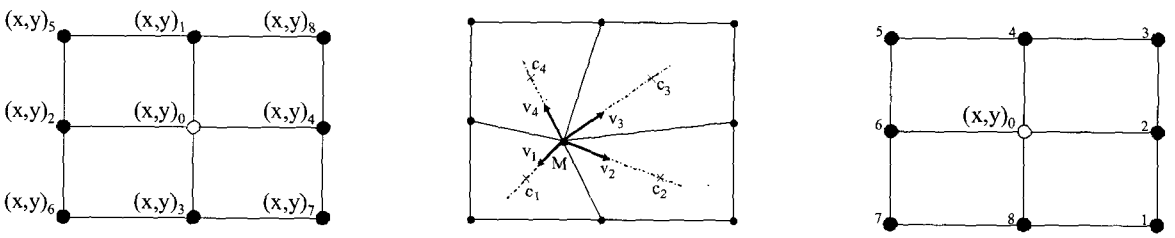
여기서 $V_i = (x_i - x_0,\ y_i - y_0)$이다.

Weighted area 방법은 기본적으로 한 절점을 둘러싸고 있는 각각의 요소들은 각 요소들의 중심(center)으로 절점을 끌어당긴다는 생각으로부터 출발한다. 이러한 끌어당기는 힘은 각 요소들의 면적과 벡터로부터 구해진다. 예를 들면 그림 1(b)에서 절점 M은 요소 중심 c_1으로부터 c_3로 이동한다.

$$\Delta V_W = \frac{\Sigma_{i=1}^{nel} A_i \nu_i}{\Sigma_{i=1}^{nel} A_i} \tag{8}$$

여기서 A_i는 이웃한 요소들의 면적, ν_i는 $(x, y)_0$로부터 요소의 질량 중심까지의 벡터, nel은 요소 수이다.

마지막으로 Equipotential 방법은 한 절점에 이웃한 모든 절점들의 위치를 계산하여 재배치하는 방법으로 대각선상에 존재하는 두 개의 이웃한 절점 사이에 동일한 가중치를 사용한다. 즉 그림 1(c)에서와 같이 인접한



(a) Laplacian 방법 (b) Weighted area 방법 (c) Equipotential 방법

그림 1. Adaptive meshing 기법(Hyun & Lindgren, 2001; Susila & Hryciw, 2003)

절점 1과 5, 2와 6, 3과 7, 그리고 4와 8 사이의 동일한 가중치(weights)를 사용한다. 따라서 새로운 절점의 위치는 다음과 같다.

$$(x, y)_{new} = \frac{\sum_{i=1}^{8} \zeta(x, y)_i}{\sum_{i=1}^{8} \zeta_i} \tag{9}$$

여기서 가중치(weight)는 다음과 같다.

$$\zeta_1 = \zeta_5 = \frac{1}{2}\left[(x_2 - x_6)(x_4 - x_8) + (y_2 - y_6)(y_4 - y_8)\right] \tag{10a}$$

$$\zeta_2 = \zeta_6 = \frac{1}{4}\left[(x_4 - x_8)^2 + (y_4 - y_8)^2\right] \tag{10b}$$

$$\zeta_4 = \zeta_8 = \frac{1}{4}\left[(x_2 - x_6)^2 + (y_2 - y_6)^2\right] \tag{10c}$$

$$\zeta_3 = \zeta_7 = -\zeta_5 \tag{10d}$$

3.3 ABAQUS/Explicit에서의 Contact Algorithm

ABAQUS/Explicit에서는 두 표면(surface) 사이의 접촉(contact)을 모사할 수 있으며 사용되는 contact 알고리즘은 ABAQUS/Explicit에 소개되어 있다(Hibbit 등, 2005). 본 논문에서는 contact 알고리즘에 대해서 간략히 설명하였다. 접촉하고자 하는 각각의 표면은 master와 slave간의 관계로 고려된다. Master 면에 있는 절점들은 slave 면을 관입할 수 있으나 반대로 slave 면에 있는 절점들은 master 면으로 관입할 수 없다. Flat DMT의 관입 문제의 경우 blade를 master로 고려하며 지반을 slave로 고려하였다. Slave 면으로 관입되는 것은 slave의 요소들을 세밀하게 구성함으로써 최소화할 수 있다.

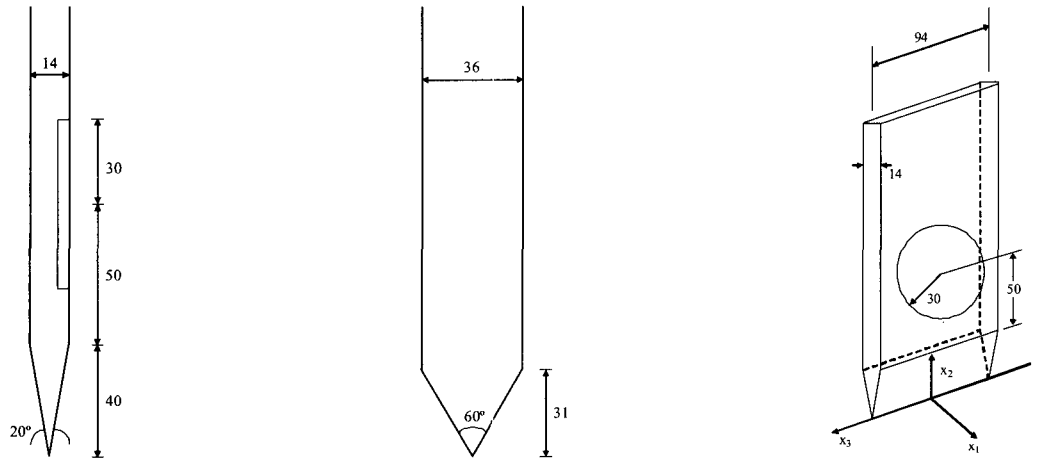
접촉을 모사하는 과정에서 중요한 부분 중에 하나는 접촉하는 면들을 찾는 것이다. ABAQUS/Explicit에서는 finite sliding과 small sliding 모델이 있으며 small sliding인 경우 물체가 큰 움직임을 경험하더라도 한 면을 따라 다른 면의 sliding이 상대적으로 거의 일어나지 않는다고 가정하는 알고리즘이다. 본 대상 문제의 경우 finite sliding 알고리즘을 사용하였다. Finite sliding 모델은 small sliding 모델에 비해서 더 좋은 결과를 보장한다(Susila & Hryciw, 2003). 또한 접촉으로부터 발생된 응력의 경우 slave 면에 있는 절점이 master 면과 접촉하지 않는다면 수직(normal) 또는 접선(tangential) 방향으로 접촉 응력을 전달하지 못하도록 모델링되었다.

4. Flat DMT의 관입 해석

Flat DMT 관입 시 대상 지반의 특성에 따라 발생되는 거동 특성을 살펴보기 위하여 상용 프로그램으로 널리 알려진 ABAQUS/Explicit를 이용하여 관입 해석을 수행하였다. 관입 해석에 적용되는 여러 해석 기법들과 특히 adaptive meshing 기법의 적용성을 살펴보기 위하여 3차원 관입 해석을 수행하기에 앞서 먼저 2차원 관입 해석을 수행하였다.

4.1 해석 단면

ABAQUS/Explicit를 이용하여 DMT blade 형상과 CPT 형상에 대하여 2차원 관입 해석을 수행하였다(그림 2(a), 2(b)). 또한 그림 2(c)의 단면형상을 이용하여



(a) DMT 형상 (b) CPT 형상 (c) 3차원 flat DMT 형상

그림 2. 관입체 형상

flat DMT에 대하여 3차원 관입을 모사하였다. 2차원 및 3차원의 경우 동일한 지반 조건하에서 관입체 형상을 달리하여 해석을 수행하였으며 관입 속도는 20mm/sec로 관입하였다.

4.2 관입체로 인한 요소 변형 특성

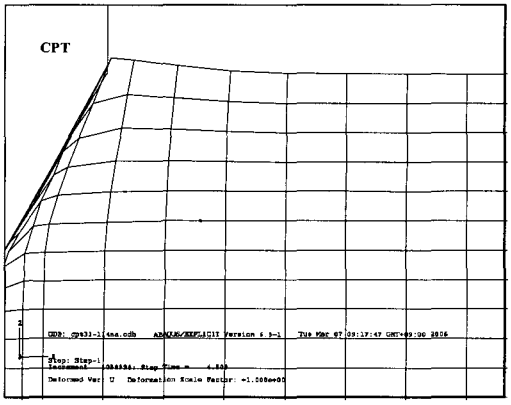
Flat DMT의 3차원 관입을 모사하기 위하여는 관입에 의한 큰 요소 변형을 해결해야 하며 이를 위하여 adaptive meshing 기법을 적용하였다. 이를 위하여 먼저 2차원 관입 문제를 해석하였다. 여러 현장 시험 방법들 중에서 CPT의 경우 flat DMT와는 달리 접촉 면적이 상대적으로 크기 때문에 2차원 모사의 경우에도 큰 요소 변형이 유발한다. 따라서 이러한 대상 문제를 이용하여 adaptive meshing 기법의 적용성을 살펴보았다. 그리고 상대적으로 작은 면적을 가지는 flat DMT에 대하여 축대칭 및 평면변형율 조건하에서 관입을 모사하였다.

4.2.1 Adaptive Mesh를 고려하지 않은 경우

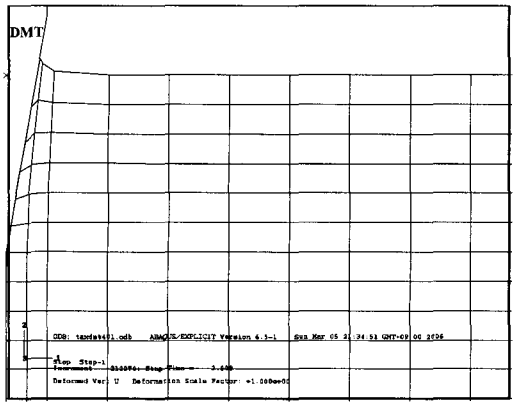
먼저 2차원 관입 해석 과정에서 adaptive meshing 기법의 적용성을 살펴보기 전에 adaptive meshing 기법을 고려하지 않은 경우에 대하여 관입을 모사하여 검토하였다. 관입체 형상에 따른 요소 변형 특성을 살펴보기 위하여 동일한 조건하에서 CPT와 flat DMT의 관입을 모사하였다. CPT와 flat DMT의 해석 결과에서 알 수 있듯이 관입체 주변 요소가 변형이 크게 발생함을 확인할 수 있으며 특히 CPT의 경우 훨씬 큰 요소 변형을 허용함을 볼 수 있다(그림 3). 따라서 CPT의 경우 해석이 수렴되지 않는 결과를 주었다. 반면에 그림 4와 같이 flat DMT의 경우 관입으로 인하여 관입체 주변에서 큰 요소 변형이 발생하지만 CPT에 비하여 변형 크기가 작다. 그리고 대부분의 이전 연구들에 의하면 flat DMT의 경우 접촉면 바로 인접한 영역에서 발생된 큰 요소 변형을 고려하여 어느 정도 떨어진 지점에서의 접촉응력을 구함으로써 adaptive mesh를 고려하지 않은 경우에도 flat DMT는 CPT와는 달리 적용이 가능하다고 하였다.

4.2.2 Adaptive Mesh를 고려한 경우

다음은 adaptive mesh를 고려한 경우에 대하여 관입체 주변에서의 요소 변형을 관찰하였다. 축대칭 조건인 CPT와는 달리 flat DMT의 경우 평면변형율 조건이므로 이를 고려하여 관입을 모사하였다. 그림 5에서 알 수 있듯이 앞에서 adaptive mesh를 고려하지 않은 경우와 비교하면 좋은 품질의 요소를 나타내는 것을 확인할 수 있다.



(a) CPT 초기 관입



(b) DMT 초기 관입

그림 3. Adaptive meshing 기법을 적용하지 않은 경우

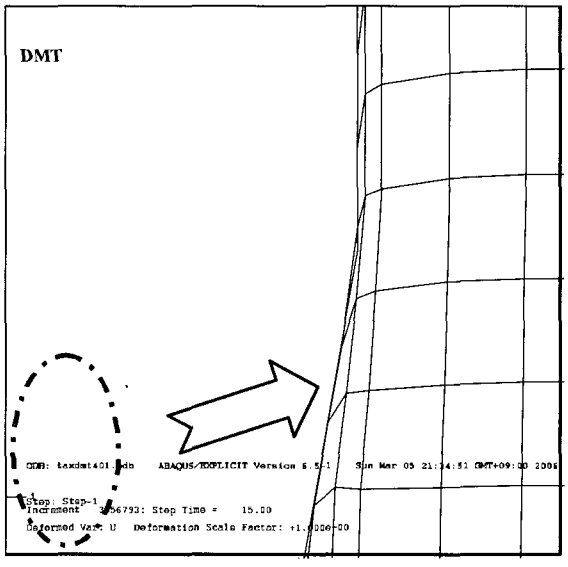
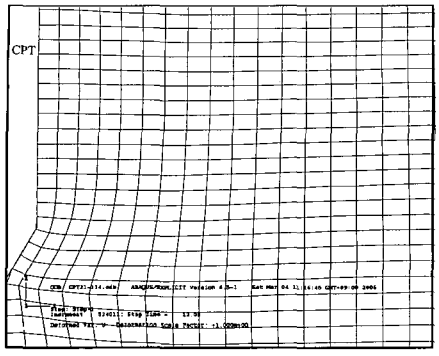
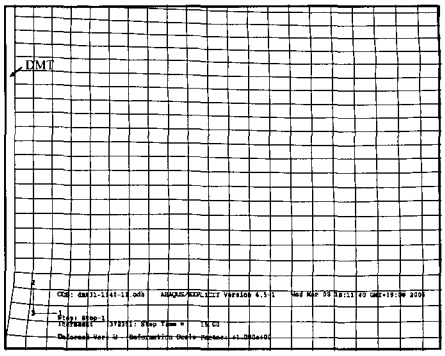


그림 4. DMT 관입이 진행된 후(adaptive mesh를 적용하지 않은 경우)



(a) CPT 초기 관입



(b) DMT 초기 관입

그림 5. Adaptive meshing 기법을 적용한 경우

4.3 Flat DMT의 3차원 관입 해석

CPT와는 달리 flat DMT의 경우 관입체가 3차원 형상이므로 엄밀한 해석을 위하여 3차원 관입 해석을 수행하였다. 앞의 2차원 해석과 동일한 조건으로 adaptive meshing 기법을 적용하여 관입 해석을 수행하였다.

3차원 관입 해석 결과로부터 관입으로 발생된 수평응력과 소성변위 분포를 도시하였다(그림 6~그림 7). 그림 7(a)에서 알 수 있듯이 관입으로 인하여 선단 부근에서 큰 수평응력이 발생하는 것을 확인하였다. 그리고 그림 6에서 원으로 표시된 영역은 DMT blade의 membrane이 거동하는 영역으로 이 영역에서의 수평응력 및 소성변위가 접촉응력, 즉 p_0값에 영향을 미치게 된다. 3차원 관입 해석 결과에서 알 수 있듯이 membrane 영역에서 일정한 응력값을 갖는 것이 아니라 변화되는 응력 및 변위 형상을 확인할 수 있으며 이는 접촉 응력, 즉 p_0 값에 영향을 줄 수 있다.

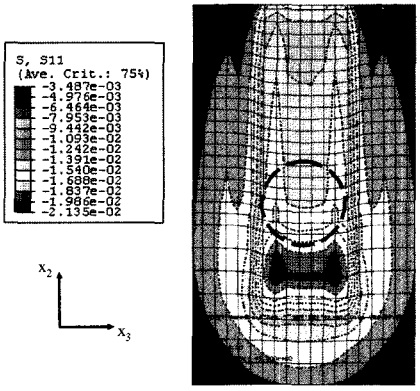
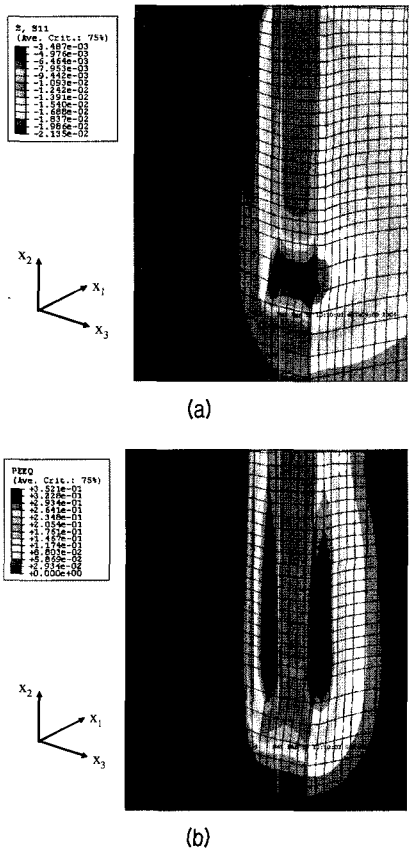


그림 6. 3차원 관입 시 수평 응력 분포

4.4 수평응력지수와 비배수 전단강도간의 관계

Flat DMT 시험 시 측정되는 관측값들 중에 하나인 초기 접촉 응력(initial contact pressure, p_0)은 관입 동안에 발생되는 총간극수압에 크게 영향을 받는다(Campanella 등, 1985). 또한 Mayne(1987)은 관입으로 발생된 총간극수압(total pore pressure)을 측정하기 위하여는 p_0를 사용해야 하며 이는 16개의 점토 지반에서 수행된 CPTU와 flat DMT 시험 결과 비교로부터 확인할 수 있었다(Mayne & Bachus, 1989).

그리고 Campanella & Robertson(1991)은 UBC에서 개발한 research DMT를 이용하여 시험한 결과 연약지반에서 관입 후 membrane에서 측정된 간극수압은 매우



(a)

(b)

그림 7. 3차원 관입 시 수평 응력 분포(a)와 소성변위 분포(b)

큰 값을 나타내지만 유효응력은 매우 작으며 시험 동안 팽창과 압력을 제거하는 동안 유효응력은 일정하게 유지하고 있는 것을 발견하였다.

그러므로 관입에 의하여 발생된 접촉 응력(contact pressure)과 p_0와의 연관성을 부여할 수 있으며 따라서 접촉 응력의 변화는 K_D의 변화와 관련성이 있다고 설명할 수 있다. 즉 수치해석을 이용하는 경우 flat DMT의 관입 후 팽창 과정을 모사하지 않고 관입에 의하여 발생된 membrane 영역에 작용한 수평응력을 이용하였다. 따라서 대상 지반의 비배수 전단강도와 K_D간의 상관관계식으로부터 알 수 있듯이 대상 지반의 강도 변화는 K_D 변화와 관련이 있으며 결국에 DMT의 관입 시 발생된 접촉 응력에 영향을 주게 된다.

이러한 상관성을 살펴보기 위하여 flat DMT를 3차원으로 모델링하여 유한요소법을 이용하여 관입 해석을 수행하였다. 대상 지반의 지반 정수들을 변화시켜가며 초기 연직응력으로 정규화한 비배수 전단강도와 membrane 영역에 작용한 수평응력간의 관계를 비교하였으며 이로부터 초기 연직응력으로 정규화한 비배수 전단강도와 수평응력지수(K_D)간의 관계를 파악하였다.

대상 지반은 von Mises 항복조건을 가지는 탄소성 모델로 고려하였으며 관입으로 인한 영향을 살펴보기 위하여 대상 지반의 탄성계수, 초기 연직응력 그리고 비배수 전단강도를 조합하여 해석하였다. 먼저 관입 깊이가 크지 않기 때문에 대상 지반에 걸쳐 균등한 연직응력 분포를 갖는다고 가정하였다. 또한 지반과 관입체 사이의 마찰은 고려하지 않았으며 정지토압계수(K_0)는 1로 가정하였다.

(1) 탄성계수에 의한 영향

먼저 정규화한 비배수 전단강도를 일정한 조건 하에서 탄성계수를 증가시킨 경우에 대하여 관입 해석을 수행하였다. 기존에 제안된 경험적 상관관계식의 경우 탄성계수에 대하여는 고려하지 않고 있으며 수평응력지수와 비배수 전단강도 간의 관계만을 제안하고 있다. 그러나 유한요소법을 이용한 관입 해석의 경우 사용되는 설계변수들 중에 탄성계수를 필요로 하며 따라서 탄성계수 값은 관입 해석에 영향을 줄 것이다.

따라서 탄성계수에 대한 영향을 살펴보기 위하여 표 1에 제시된 조건과 같이 탄성계수와 강도 비가 각각 일정한 상태에서 연직응력을 달리하여 해석을 수행하였으며, 또한 표 2에서와 같이 탄성계수와 연직응력 비가 일정한 조건하에서 강도를 달리하여 해석을 수행하였다. 표 1과 표 2의 조건으로부터 구한 수치해석 결과를 그림 8~그림 10에 도시하였다. 또한 변위용 등(2004a)의 논문에서 제시한 국내 지반으로부터 구한 수평응력지수와 초기 연직응력으로 정규화한 비배수 전단강도 간의 상관관계식과 기존에 제안된 Marchetti(1980) 식 및 Kamei & Iwasaki(1995) 식을 함께 도시하였다. 그리고 변위용 등(2004b)의 논문에서 인공신경망 모델을 훈련 및 검증하기 위하여 사용된 자료들을 함께 도시하여 수치해석으로부터 구한 결과와 비교하였다.

그림 8과 10에서 알 수 있듯이 탄성계수 증가에 따른 접촉응력 변화는 초기 연직응력과 지반의 비배수 전단강도에 의한 영향에 비하여 크지 않은 결과를 보여주고 있다. 또한 이러한 탄성계수에 의한 영향은 대상 지반의 종류와 관련된 것으로 볼 수 있으며 따라서 기존에 제안된 경험적 상관관계식의 경우와 동일하게 수평응력지수와 비배수 전단강도 간의 관계를 모사하였다.

표 1. E/s_u 변화에 따른 수치해석 결과

	E	σ'_{v0}	s_u	K_D	s_u/σ'_{v0}
E/s_u=150	3000.00	10.00	20.00	8.12	2.00
	3000.00	20.00	20.00	4.46	1.00
	3000.00	30.00	20.00	3.24	0.67
	3000.00	40.00	20.00	2.71	0.50
E/s_u=300	6000.00	10.00	20.00	8.98	2.00
	6000.00	20.00	20.00	4.98	1.00
	6000.00	30.00	20.00	3.65	0.67
	6000.00	40.00	20.00	3.01	0.50
E/s_u=450	9000.00	10.00	20.00	9.61	2.00
	9000.00	20.00	20.00	5.34	1.00
	9000.00	30.00	20.00	3.94	0.67
	9000.00	40.00	20.00	3.19	0.50

표 2. E/σ'_{v0}=150인 조건 하에서의 수치해석 결과

	E	σ'_{v0}	s_u	K_D	s_u/σ'_{v0}
E/σ'_{v0}=150	3000.00	20.00	5.00	2.20	0.25
	3000.00	20.00	10.00	3.02	0.50
	3000.00	20.00	15.00	3.79	0.75
	3000.00	20.00	20.00	4.46	1.00
E/σ'_{v0}=150	4500.00	30.00	10.00	2.47	0.33
	4500.00	30.00	15.00	3.03	0.50
	4500.00	30.00	20.00	3.47	0.67
E/σ'_{v0}=150	6000.00	40.00	10.00	2.17	0.25
	6000.00	40.00	15.00	2.59	0.38
	6000.00	40.00	20.00	3.01	0.50

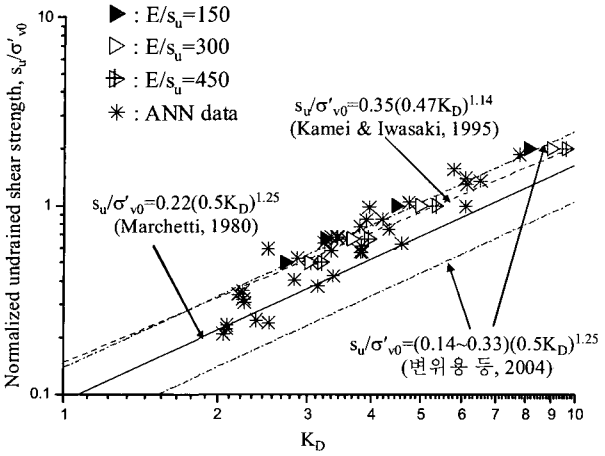


그림 8. E/s_u를 변화시켜 가며 초기 응력에 따른 수치해석 결과

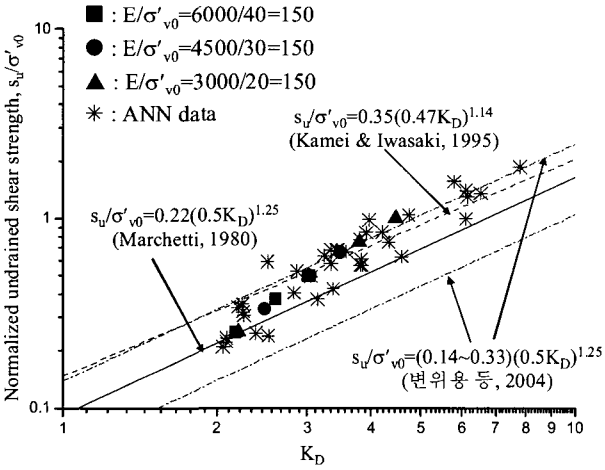


그림 9. E/σ'_{v0}=150인 조건하에 따른 수치해석 결과

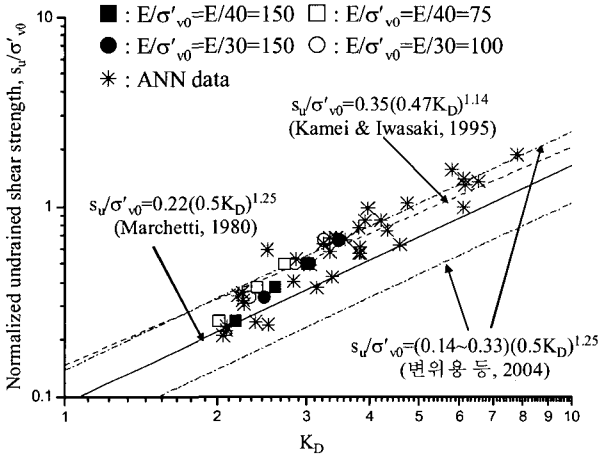


그림 10. 탄성계수 증가에 따른 수치해석 결과

(2) E/σ'_{v0} 변화에 따른 관입 해석 결과

표 3에서 제시한 바와 같이 대상 지반의 탄성계수와 초기 연직응력 비를 75, 100, 150인 경우에 강도를 변화시켜 관입 해석을 수행하였으며 해석된 결과로부터 수

표 3. E/σ_{v0} 변화에 따른 수치해석 결과

	E	σ'_{v0}	s_u	K_D	s_u/σ'_{v0}
E/σ'_{v0}=150	3000.00	20.00	5.00	2.20	0.25
	3000.00	20.00	10.00	3.02	0.50
	3000.00	20.00	15.00	3.79	0.75
	3000.00	20.00	20.00	4.46	1.00
E/σ'_{v0}=100	3000.00	30.00	10.00	2.31	0.33
	3000.00	30.00	15.00	2.84	0.50
	3000.00	30.00	20.00	3.24	0.67
E/σ'_{v0}=75	3000.00	40.00	10.00	2.01	0.25
	3000.00	40.00	15.00	2.39	0.38
	3000.00	40.00	20.00	2.71	0.50

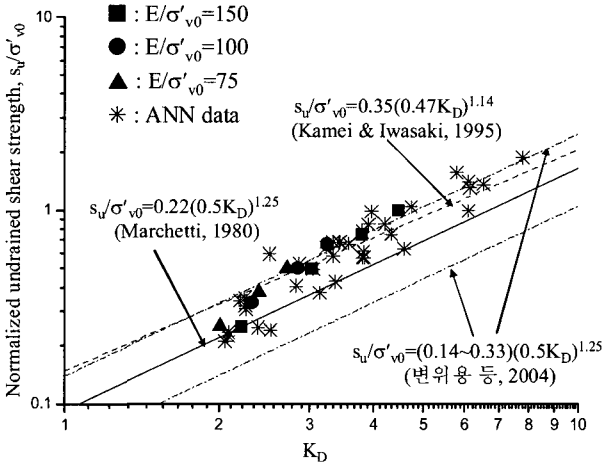


그림 11. E/σ'_{v0} 변화에 따른 수치해석 결과

평응력지수와 초기 연직응력으로 정규화한 비배수 전단강도를 도시하였다(그림 11).

Marchetti(1980)는 Ladd 등(1977)이 제안한 상관관계식과 Mesri(1975)가 현장 베인시험 결과로부터 제안한 $(s_u/\sigma_{v0}')_{NC}$=0.22를 이용하여 비배수 전단강도식을 제안하였다. 또한 Marchetti(1980)는 수평응력지수로부터 과압밀비를 예측하는 상관관계식을 제안하였으며 제안된 식은 OCR=1일 때 K_D=2를 내포하고 있다. 따라서 표 3에서 대략적으로 s_u/σ_{v0}'=0.25인 경우 K_D=2.2이므로 정규압밀지반으로 고려할 수 있다.

수치해석으로부터 구한 수평응력지수와 연직유효응력으로 정규화한 비배수 전단강도간의 관계(그림 11)에서 알 수 있듯이 정규압밀지반의 경우 Marchetti(1980)가 제안한 상관관계식을 따르며 점차 강도가 증가되면서 Kamei & Iwasaki(1995)가 제안한 상관관계식과 일치하는 결과를 보여주고 있다. 또한 국내 지반 자료로부터 구한 경험적 상관관계식의 경우와도 잘 일치하는 결과를 제공하는 것을 확인할 수 있다.

또한 Marchetti(1980)는 OC 지반에서는 깊이에 따라 수평응력지수가 감소하는 것을 발견하였다. 표 3과 그림 11에서 알 수 있듯이 수치해석 결과로부터 동일 강도에 대하여 깊이에 따른 수평응력지수의 변화를 살펴보면 수평응력지수가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

(3) 정규화한 비배수 전단강도에 따른 해석 결과

대상 지반의 탄성계수가 일정한 조건 하에 초기 연직응력으로 정규화한 비배수 전단강도가 0.5와 1.0일 때의 수평응력지수를 구하여 그림 12에 도시하였다. 이때 표 4에서 제시된 바와 같이 탄성계수가 일정한 조건하에 초기 연직응력과 비배수 전단강도가 일정한 비를 갖도록 변화시켜 가며 관입 해석을 수행하였다.

표 4와 그림 12를 살펴보면 탄성계수로 인한 영향이 확인되었으며 따라서 탄성계수를 초기 연직응력과 비배수 전단강도에 따라 비례하여 증가시켜 해석을 수행하였다.

표 5와 그림 13에서 알 수 있듯이 수평응력지수와 초기 연직응력으로 정규화한 비배수 전단강도 간의 관계가 일정한 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 그리고 K_D=2 부근에서 Marchetti(1980)가 제안한 상관관계식과 잘 부합하며 OC영역에서는 Kamei & Iwasaki(1995) 식과 잘 일치하는 경향을 주는 것을 확인하였다. 따라서 기존에 제안된 수평응력지수와 비배수 전단강도 간의 관계가 적합한 상관식임을 확인할 수 있다. 그러나 이러한 상관관계식은 대상 지반의 지반 특성에 따라 달라 질 수 있으므로 지역적인 특성을 고려한 상관관계식 도출이 필요하다.

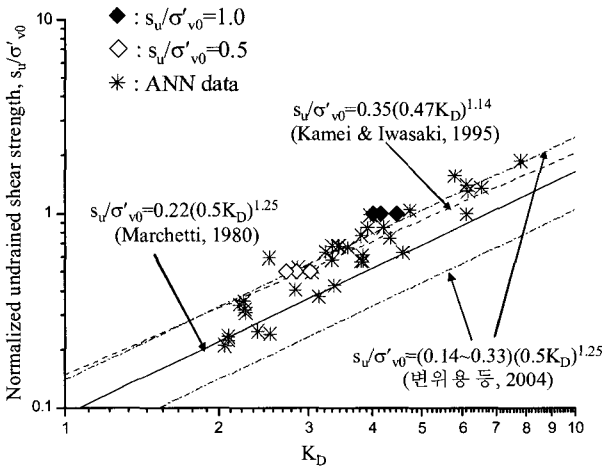


그림 12. s_u/σ'_{v0}가 1.0, 0.5인 경우 수치해석 결과

표 4. s_u/σ'_{v0}가 1.0과 0.5인 조건 하에서의 수치해석 결과

	E	σ'_{v0}	s_u	K_D	s_u/σ'_{v0}
	3000	20	20	4.46	1.00
s_u/σ'_{v0}=1.0	3000	30	30	4.16	1.00
	3000	40	40	4.01	1.00
	3000	20	10	3.02	0.5
s_u/σ'_{v0}=0.5	3000	30	15	2.84	0.5
	3000	40	20	2.71	0.5

5. 결 론

대부분의 관입을 동반하는 현장 시험방법을 모사하기 위하여 여러 수치해석적인 방법들이 제안되었으며 특히 CPT의 경우 축대칭 문제로 가정하여 많은 연구가 진행되었다. 그러나 flat DMT는 DMT blade 형상으로

표 5. E-σ'_{v0}-s_u 변화에 따른 수치해석 결과

E	σ'_{v0}	s_u	K_D	s_u/σ'_{v0}
3000	20	4	2.05	0.2
6000	40	8	2.00	0.2
3000	20	5	2.20	0.25
6000	40	10	2.17	0.25
3000	20	10	3.02	0.5
4500	30	15	3.03	0.5
6000	40	20	3.01	0.5
3000	20	20	4.46	1.0
4500	30	30	4.46	1.0
6000	40	40	4.51	1.0
1500	5	10	8.01	2.0
3000	10	20	8.12	2.0
4500	15	30	7.88	2.0
6000	20	40	7.95	2.0

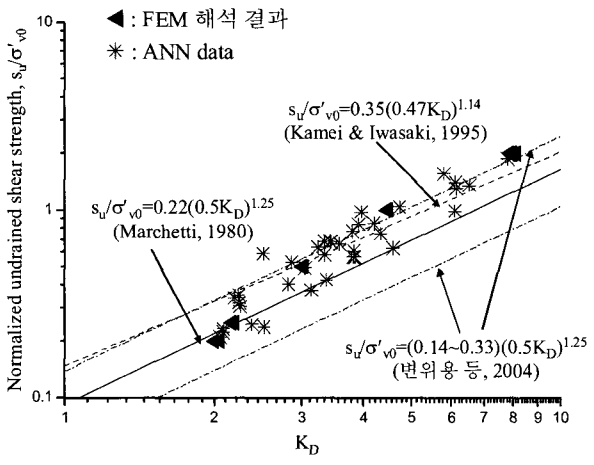


그림 13. E-σ'_{v0}-s_u에 따른 수치해석 결과

인하여 3차원 문제이며 따라서 flat DMT의 관입을 모사하기 위하여 3차원 관입 해석이 이루어져야 한다.

본 논문에서는 상용프로그램으로 널리 알려진 ABAQUS/Explicit을 이용하여 flat DMT의 3차원 관입 모사를 수행하였으며 3차원 관입 해석결과로부터 수평응력지수와 비배수 전단강도 간의 관계를 파악하였다. 먼저 기존에 제안된 상관관계식의 경우에는 고려되지 않는 탄성계수에 의한 영향을 살펴보았으며 초기 연직응력과 비배수 전단강도에 비하여 수평응력지수와 비배수 전단강도 간의 관계에는 작은 영향을 미치고 있다. 또한 이러한 탄성계수에 의한 영향은 주어진 지반의 특성에 의한 영향으로 유추할 수 있다.

그리고 3차원 관입 해석결과로부터 구한 수평응력지수와 비배수 전단강도 관계를 살펴보기 위하여 기존에 제안된 Marchetti(1980)식과 Kamei & Iwasaki(1995)식을 도시하였으며 국내 지반에서 수행된 자료로부터 구한 경험적 상관관계식(변위용 등, 2004a)도 함께 도시하였다. 그리고 변위용 등(2004b)의 논문에서 사용된 국내 지반 자료를 함께 도시하여 수치해석 결과로부터 구한 값과 비교하였다. 해석 결과에서 알 수 있듯이 K_D=2인 정규압밀 영역의 경우 Marchetti(1980)식에 부합하는 결과를 보여주었으며 OC 영역으로 갈수록 Kamei & Iwasaki(1995)식에 부합하는 결과를 제공하는 것을 알 수 있다.

그러나 관입으로 발생된 수평응력은 지반 내의 강도뿐 아니라 여러 요인들에 의해 영향을 받는다. 그러므로 추후 더 엄밀한 검토가 필요하며 특히 관입 시 발생되는 과잉간극수압에 의한 영향이 매우 중요한 역할을 수행하기 때문에 유효응력을 고려할 수 있는 모델을 이용하여 이에 대한 영향 등을 파악할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 선정한 스마트 사회기반시설연구센터(생산기반 분야/ERC)의 연구비 지원으로 수행된 것으로 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 변위용, 김영상, 이승래 (2004a), "Flat DMT를 이용한 국내 연약지반의 비배수 전단강도 추정 시 영향을 미치는 요소들", *한국지반공학회논문집*, 제20권, 제4호, pp.103-113.
2. 변위용, 김영상, 이승래, 정은택 (2004b), "국내 연약지반의 신뢰성있는 비배수 전단강도 추정을 위한 flat DMT와 인공신경망 이론의 적용", *한국지반공학회논문집*, 제20권, 제5호, pp.17-25.
3. Campanella, R. G., Robertson, P. K., Gillespire, D. and Grieg, J. (1985), "Recent Developments in In-Situ Testing of Soils", *Proceedings, 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.2, San Francisco, pp.849-854.
4. Campanella, R. G. and Robertson, P. K. (1991), "Use and interpretation of a research dilatometer", *Can. Geotech. J.*, Vol.28, No.1, pp.113-126.
5. Hamel, V., Roelandt, J. M., Gacel, J. N. and Schmit, F. (2000), "Finite element modeling of clinch forming with automatic remeshing", *Computers & Structures*, Vol.77, No.2, pp.185-200.
6. Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc. (2005), *ABAQUS/Explicit User's Manual.* Version. 6.5.
7. Hyun, S. and Lindgren, L. (2001), "Smoothing and adaptive remeshing schemes for graded element", *Communications in Numerical Methods in Engineering*, Vol.17, pp.1-17.
8. Kamei, T. and Iwasaki, K. (1995), "Evaluation of undrained shear strength of cohesive soils using a flat dilatometer", *Soils and Foundations*, Vol.35, No.2, pp.111-116.
9. Ladd, C. C., Foot, R., Ishihara, K., Poulos, H. G. and Schlosser, F. (1977), "Stress-deformation and strength characteristics", *Proc. 9th ICSMFE*, Vol.2, State-of-the-Art-Paper, pp.421-494.
10. Marchetti, S. (1980), "In situ tests by flat dilatometer", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.106, No.GT3, pp.299-321.
11. Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G. and Calabrese, M. (2001), "The flat dilatometer test (DMT) in soil investigations. A Report by the ISSMGE Committee TC 16.", *Proc. IN SITU 2001, Intnl. Conf. On In Situ Measurement of Soil Properties*, Bali Indonesia, pp.1-41.
12. Mayne, P. W. (1987), "Determining preconsolidation stress and penetration pore pressures from DMT contact pressures", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.10, No.3, pp.146-150.
13. Mayne, P. W. and Bachus, R. C. (1989), "Penetration Pore Pressure in Clay by CPTU, DMT, and SBP", *Proceedings, 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, Rio de Janeiro, pp.291-294.
14. Mesri, G. (1975), Discussion of "New design procedure for stability of soft clays" by Ladd, C.C., Foott, R., *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.101, No.GT4, pp.409-412.
15. Rebelo, N., Nagtegaal, J. C. and Taylor, L. M. (1992), "Comparison of implicit and explicit finite element methods in the simulation of metal forming processes", In *Numerical Methods in Industrial Forming Processes*, Chenot, Wood, Zienkiewicz eds., pp.99-108.
16. Sun, J. S., Lee, K. H. and Lee, H. P. (2000), "Comparison of implicit and explicit finite element methods for dynamic problems", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.105, No.1, pp.110-118.
17. Susila, E. and Hryciw, R. D. (2003), "Large displacement FEM modeling of the cone penetration test (CPT) in normally consolidated sand", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, Vol.27, No.7, pp.585-602.
18. Teh, C. I. and Houlsby, G. T. (1991), "An analytical study of the cone penetration test in clay", *Geotechnique*, Vol.41, No.1, pp.17-34.

(접수일자 2006. 9. 28, 심사완료일 2006. 12. 26)