

점토의 변형률 속도 의존성을 고려한 비선형 유한변형 압밀해석

Finite Strain and Nonlinear Consolidation Analysis Considering the Effect of Strain Rate Dependency on Clay

이 봉 직¹⁾ · 이 흥 길¹⁾ · 권 영 철[†]

Lee, Bongjik · Lee, Heunggil · Kwon, Youngcheul

ABSTRACT : In recent years, finite strain consolidation theories including a mechanical nonlinearity and a reasonable coordinate system have been proposed and used in educations and practical consolidation problems. However, despite their reasonable ability to predict the consolidation behavior, their failure in the field can be attributed to the complexity of estimating and selecting proper parameters for simulating the consolidation phenomenon. In this study, therefore, the application of a piecewise-linear method was proposed to solve such problems including the assumption of the uniqueness in compressibility. Especially, the concept of reference curve was introduced to define the effect of strain rate dependency of clay. The applicability of the methodology is verified by several tests. It was found that the proposed method is applicable in restrictive ranges of study carried out in the laboratory. Finally it is expected that the verification in field consolidation problem has to be carried out through future study.

Keywords : Finite strain, Mechanical nonlinearity, Strain rate dependency, Piecewise-linear, Reference curve

요 지 : 재료적 비선형성과 합리적인 좌표계의 도입이 압밀문제에 있어 중요한 자리를 점한다는 인식에서 비선형 유한변형압밀이론이 제안되어 왔으나 너무 어려운 매개변수 설정 등의 문제점에 의해 일반적인 압밀해석에서 널리 사용되고 있지는 못하다. 본 연구에서는 구분선형(piecewise-linear) 압밀이론을 이용하여 점토의 변형률 속도 의존성을 고려한 압밀해석이 가능한 해석법을 제시하는 것을 목표로 하였다. 특히 유사한 방법에서 큰 문제가 되어 왔던 압축곡선의 유일성을 해결할 수 있는 방안으로 기준곡선을 이용하는 방안을 도입하였다. 개발된 해석법의 검증을 위해 실시된 일련의 과정을 통해 모델의 적용성을 일부 확인하였으며 향후 제한적인 실내실험결과에서 확장하여 실제 압밀문제에 대한 적용성 확인 등의 연구가 수행되어야 할 것으로 판단하고 있다.

주요어 : 유한변형, 비선형압밀, 변형률 속도 의존성, 구분선형법, 기준곡선

1. 서 론

압밀침하를 계산하는 목적은 최종 압밀침하의 크기와 시간적인 분포를 예측하는 것이다. 특히 연약한 점토의 경우에는 압축성과 투수성의 비선형성을 침하해석에 어떻게 도입하는 지와 수%~수십 %에 달하는 변형률을 일으키는 경우 시시각각 변화하는 좌표를 어떻게 계산에 도입하는 지가 결과의 정확도에 큰 영향을 미치게 된다. 1920년대 Terzaghi에 의해 발표된 통상적인 압밀이론은 실무적인 측면 그리고 교육적인 측면에서 80년 이상 사용되고 있다. 그러나 이러한 고전적인 압밀이론은 미소 혹은 제로변형률 조건(infinitesimal or zero strain condition)을 가정하거나 압축성과 투수성을 압밀 중에 일정하게 고정하는 등의 불합리한 가정을 포함하고 있다. 그러나 실제로 압밀 중에 발생하는 점토의 압축성과 투수성의 비선형성은 광범위하

게 인정되고 있으며, 따라서 고전적인 이론이 매우 개략적이며 분명한 한계를 갖고 있다는 점을 많은 지반공학자들이 인식하고 있다(Bjerrum 1973; Duncan 1993; Alfredo, et al. 2002).

이러한 한계에 대한 인식으로부터 일차원 압밀이론에 있어 구성방정식의 비선형성을 고려하거나 흙의 비등방성 혹은 시간 의존적 특성을 고려하고자 하는 해석법들이 개발되어 왔다. 특히, 연약 점토에서의 지반 형상 변화와 재료적 비선형성을 고려하고자 하는 연구가 활발하게 진행되어 왔으며, 대표적으로 Mikasa(1964)와 Gibson, et al.(1967; 1981)의 연구를 들 수 있다. 그러나 비선형성을 규정하는 매개변수(대표적으로 Gibson 등의 연구에서의 λ 와 κ)의 규정이 매우 어려워 제한된 범위 내에서 평균값을 취해 정수로 취급하는 등 실제 적용에는 다소 한계를 포함하고 있는 것이 현실이다.

1) 정희원, 충주대학교 공과대학 토목공학부 교수

† 정희원, 한국건설기술연구원 지하구조물연구소(E-mail : kyc@kict.re.kr)

한편 Fox and Berles(1997)은 비선형 유한변형압밀 문제를 해석하기 위한 새로운 해석법인 구분선형(piecewise-linear) 압밀이론을 제안하였다. 그러나 투수성-간극비 관계의 경우 특정 흡에서 단일 곡선으로 정의하기가 비교적 쉬운 반면 유효응력-간극비 관계는 유일성을 갖는다기 보다는 또 다른 영향요소인 시간적인 영향을 받게 된다는 것이 지금까지 연구이다(예를 들어 Leroueil 등(1985)의 연구). 이른바 변형률 속도에 관련된 문제로서 점토 특유의 점성으로부터 기인한 시간의존적 특성이 발휘되어 유일한 하나의 곡선이라기 보다는 변형률 속도에 따른 일련의 곡선군으로 정의하는 것이 타당할 것이다.

따라서 본 연구에서는 구분선형법을 이용한 압밀해석을 통해서 수학적 매개변수를 사용하지 않은 편리성을 도모함과 동시에 응력-변형률-변형률 속도로 규정되는 다양한 곡선군을 규정할 수 있는 방법을 도입하여 재료의 비선형성, 대변형 문제 및 점토의 시간의존적 거동까지를 대상으로 하는 해석의 방법론적 접근을 제시하고 실내에서 실시된 검증과정을 통해 이러한 접근법의 타당성을 제시하고자 한다.

2. 압밀해석 모델

McVay, et al.(1989)과 Imai(1988)는 유한변형압밀이론의 대표적인 Mikasa와 Gibson 등의 이론이 동일한 개념이며 따라서 이론의 개발보다는 수학적 모델을 풀어나가기 위한 방법론적 접근법의 개발이 필요함을 강조하였다. 특히, Townzend and McVay(1990)은 구분선형법이 유한변형을 고려한 일차원 해석을 실시하는데 매우 유연한 방법임을 제안하였다.

본 연구에서는 특히 1997년 Fox and Berles에 의해 발

표된 구분선형 모델(CS2)을 기본적인 해석 방법으로 사용하였다. 구분선형이라는 것은 압밀해석을 위한 모든 변수들, 즉 기하학적 특성, 재료적 특성, 흐름, 유효응력 등을 해당 해석단계에서는 선형으로 가정하고 각 시간 단계의 마지막에 새롭게 갱신하는 해석법이다. 이때 시간 단계는 각 변수들을 선형으로 가정할 수 있을 만큼 충분히 작은 값을 가져야 한다. 이 해석법에서는 이류좌표계(convective coordinates, Gibson, et al, 1967)를 이용하여 좌표계를 갱신하고 있다. 그림 1(a)는 압밀이 일어나기 전인 $t=0$ 의 상황을 나타내고 있으며 (b)는 일정 시간 t 가 흐른 이후의 상태를 나타내고 있다. 시간 t 동안 $A_0B_0C_0D_0$ 는 $ABCD$ 로 변화하며 그림에서 a 는 라그란지 좌표들, $\xi(a,t)$ 는 이류좌표를 나타낸다. 즉 이류좌표계는 압밀층의 변형과 위치를 시시각각 추적할 수 있어 큰 변형이 발생하는 곳에서 매우 유연하게 대응할 수 있다.

또한, 이 모델에서는 그림 2와 같이 간극비를 기준으로 유효응력과 투수계수를 규정하는 방법으로 재료적인 비선형성을 규정하고 있다. 이는 압축성과 투수성의 구성관계를 규정함에 있어 어떠한 이상화된 매개변수도 필요치 않다는 점에서 매우 유용한 해석법으로 평가되고 있다. 결국 그림 2의 두 곡선이 압밀침하의 크기와 시간적 분포를 규정하여 압밀현상의 전체를 지배하게 되는 중요한 입력치가 되며, 압밀해석의 정도를 파악하기 위해서는 구성관계를 지배하는 이들 두 곡선의 규정이 매우 중요한 일이다.

이 해석법에서는 시간 증분($\Delta\tau$) 동안에 발생하는 각 요소의 높이 변화를 식 (1)과 같은 연속방정식으로부터 얻어내고, 이를 통해 식 (2)와 같은 시간 증분 후의 간극비의 변화를 계산한다.

$$L_j^{*\tau+\Delta\tau} = L_j^{*\tau} - (v_{vf,j}^{*\tau} - v_{vf,j+1}^{*\tau})\Delta\tau \quad (1)$$

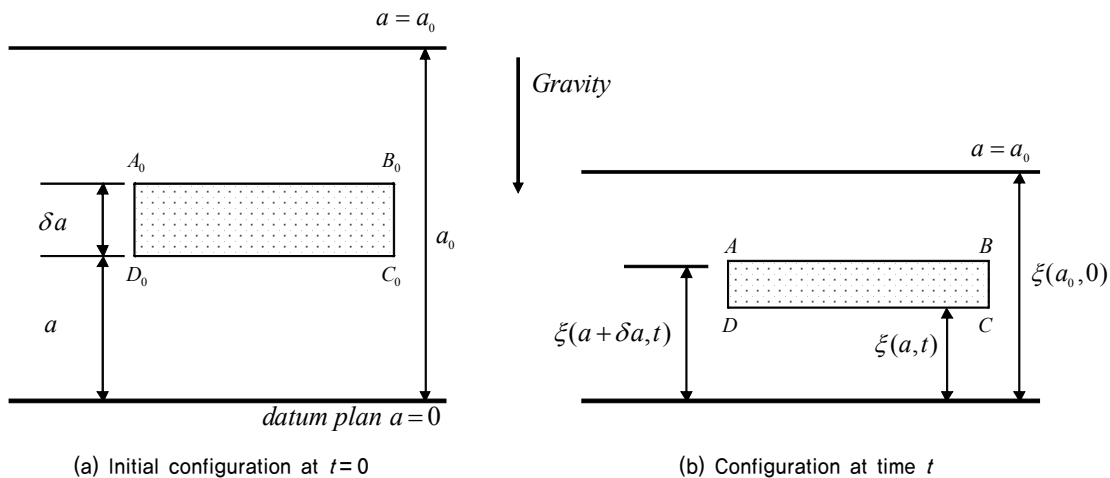
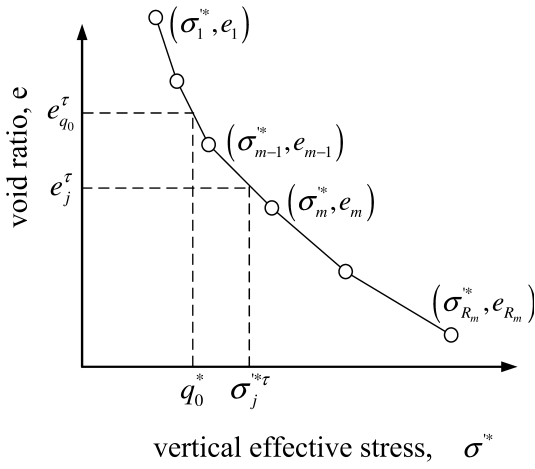
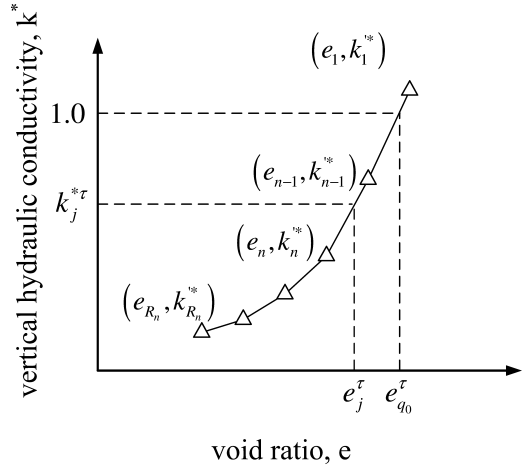


그림 1. 라그란지 좌표와 이류좌표(after Gibson, et al.(1981))



(a) 압축곡선



(b) 투수성곡선

그림 2. 흙의 구성관계 규정

$$e_j^{r+\Delta r} = \frac{L_j^{*r+\Delta r} (1 + e_{0,j})}{L_{0,j}^*} - 1 \quad (2)$$

식 (2)를 통해 얻어진 간극비의 변화를 이용하여 그림 2에 보인 두 가지의 곡선으로부터 다음 시간 단계에 사용하게 될 유효응력과 투수계수를 산정하게 된다. 이러한 과정을 시간 영역에서 반복적으로 수행함으로써 압밀침하의 크기와 시간 분포를 얻어내게 된다. 따라서 별도의 구성방정식을 수학적으로 정의할 필요가 없으며 이를 정의하기 위해 필요한 여러 가지 복잡한 매개변수 역시 불필요하게 된다.

그러나 이러한 계산과정은 단 하나의 압축곡선을 이용하므로 유효응력의 증감이 없다면 간극비의 변화도 불가능하다. 즉 고전압밀이론에서의 1차 압밀만을 대상으로 하고 있으므로 그 적용성에 제한이 있다고 저자들은 인식하고 있다. 따라서 재료의 비선형성을 고려한 유한변형압밀이론을 적용함에 있어 이러한 제한점을 극복할 필요가 있다.

그림 3에서와 같이 원곡선의 A점에서 재하가 중단되면 시간 의존적 침하를 시작하게 되면 시간의 경과와 함께 상태점이 B와 C를 거치며 간극비가 감소하게 된다. C점에서 다시 재하가 시작되면 상태점은 CD간의 과압밀 구간을 거쳐 D로 전이되게 된다. CD구간에서 과압밀과 정규압밀의 전환은 시간적으로는 매우 빠르게 발생하며 D점을 거쳐 다시 원곡선의 압축곡선을 따라 압밀이 진행되게 된다. C에서 D로 전이되는 과정에서 정확히는 D보다는 약간 낮은 D'의 점으로 전이되어야 하지만 본 연구에서는 이를 무시하고 C에서 간극비의 변화 없이 직선적으로 D점으로 옮겨간다고 가정하였다. 다시 말하면 시간의존적 변형에 의해 발생하는 과압밀의 해소는 순간적으로 발생하며 이후

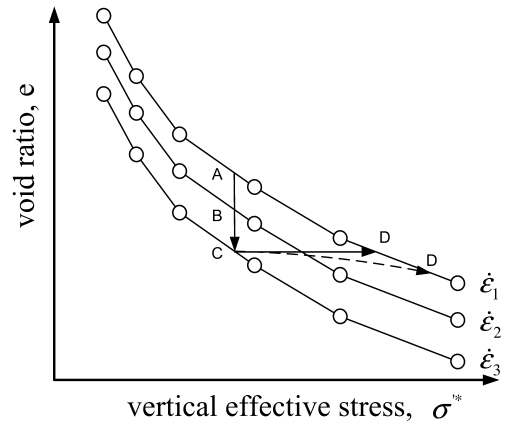


그림 3. 재하 중단 이후 재재하까지 상태점의 이동

정규압밀곡선을 따라 변형하게 되는 방법으로 압밀침하를 계산하게 된다.

그림 3과 같은 모델을 적용시키기 위해서는 변형률 속도에 따른 압축곡선의 위치를 결정하는 방법이 필요하다. Leroueil 등(1985)은 자연퇴적점토의 변형률 속도 의존 특성을 아래와 같이 정의하였다.

$$p_c = f(\dot{\epsilon}) \quad (3)$$

$$p/p_c = g(\epsilon) \quad (4)$$

위의 식은 압밀압력 p 와 변형률 ϵ 과의 관계를 규정하는 압축곡선에서 선형압밀압력 p_c 가 변형률 속도 $\dot{\epsilon}$ 에 의존하고 있다는 사실을 표현하고 있다. 또한 Kobayashi, et al.(2005)은 식 (1)에서 변형률 속도 $\dot{\epsilon}$ 이 0에 가까워질 때 선형압밀압력 p_c 는 0에 가까워지지 않고 그림 4와 같이 어떤 하한치 p_{cL} 에 접근하는 점에 주목하여 식 (5)를 제안하였다. 본 연구에서는 식 (5)를 이용하여 점토의 변형률 의존성을 고

려하였다.

$$\log \left[\frac{p_c - p_{cl}}{p_{cl}} \right] = c'_3 + c'_4 \log \dot{\epsilon} \quad (5)$$

여기서 c'_3 와 c'_4 는 정수이다.

또한, 압축에 의해 발생하는 변형률 ϵ 은 시간의 영향을 받지 않는 ϵ_e 와 시간 의존적인 점소성 성분 ϵ_{vp} 의 합으로서 다음 식으로 표현 가능하다.

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_{vp} \quad (6)$$

발생한 변형률에서 탄성성분을 뺀 점소성 변형만 시간 의존적 거동에 영향을 미치고 있으므로 다음과 같이 정리할 수 있으며 그림 5와 같이 표현할 수 있다.

$$p_c = f_2(\dot{\epsilon}_{vp}) \quad (7)$$

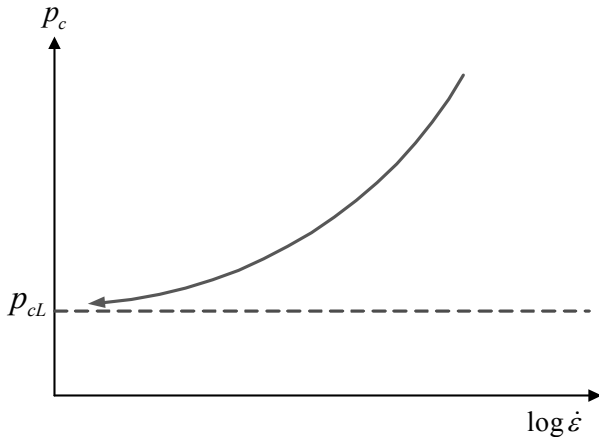


그림 4. 선행압밀압력의 변형률 속도의존성

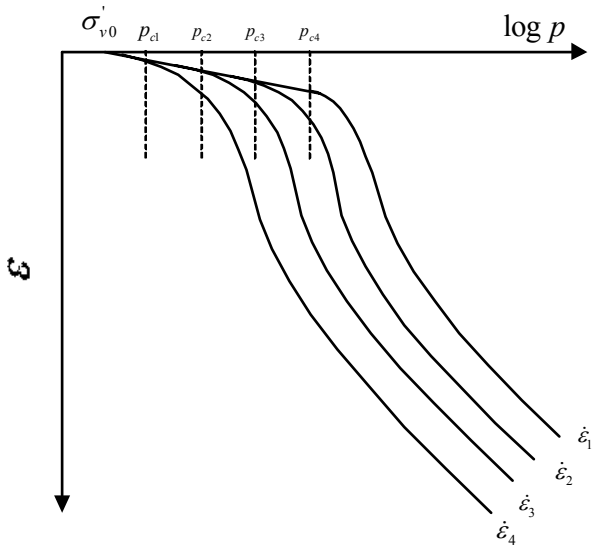


그림 5. 압축곡선의 변형률 속도 의존성

$$p/p_c = g_2(\epsilon_{vp}) \quad (8)$$

식 (8)과 같이 변형률 속도가 다른 압축곡선을 각각 선행압밀압력 p_c 로 정규화함으로써 모든 곡선을 그림 6과 같이 어느 하나의 유일한 곡선(기준곡선)으로 표현할 수 있다. 결국 기준곡선과 어느 임의의 변형률 속도의 $p_c(\dot{\epsilon})$ 만 결정되면 기준곡선에 이 값을 곱하여 임의의 변형률 속도에 있어 압축곡선을 결정할 수 있다. 또한, 탄성변형률 ϵ_e 은 변형률이 0인 지점부터 선행압밀압력에 이르기 이전의 한 점까지를 연결하는 직선의 기울기 C_{se} 를 이용하여 다음 식 (9)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\epsilon_e = C_{se} \log p \quad (9)$$

3. 프로그램의 구성

3.1 기하형상의 정의

그림 7에서는 본 연구에서 사용한 압밀모델에서의 기본적인 기하형상의 정의를 나타내고 있다. 그림 7(a)에서는 압밀하중을 받기 이전에 포화된 압밀층이 초기압밀압력을 받고 있을 때의 구성을 나타내고 있다. 이 상태에서 초기 높이는 다층지반으로 구성된 전체 압축층의 초기높이로 표현되며 모든 요소는 흙 입자와 비압축성의 간극수로 이루어진 이상(two phases)구조를 갖고 있다. 연직 좌표 z 는 하부의 기준면으로부터 연직방향의 위치를 표현하고 있으며 상향이 정(positive)이다. 흙은 초기에 자중과 유효상재 하중 q_0 로 완전히 압밀 되었으며 상하부의 경계면은 배수 혹은 비배수로 지정이 가능하다. 시간의 경과에 따라 압밀

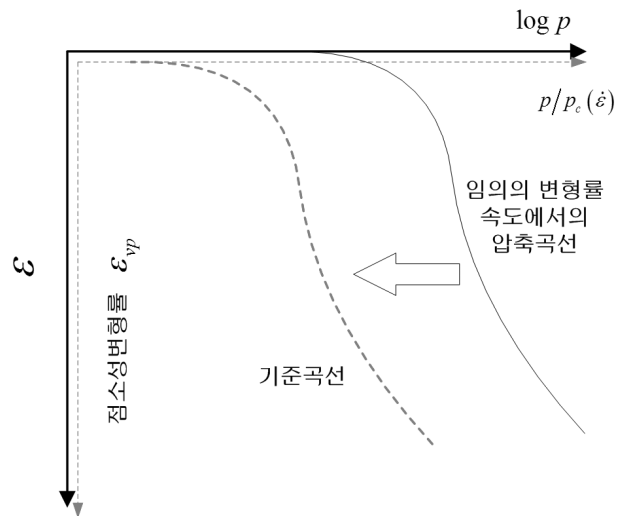


그림 6. 기준곡선의 정의

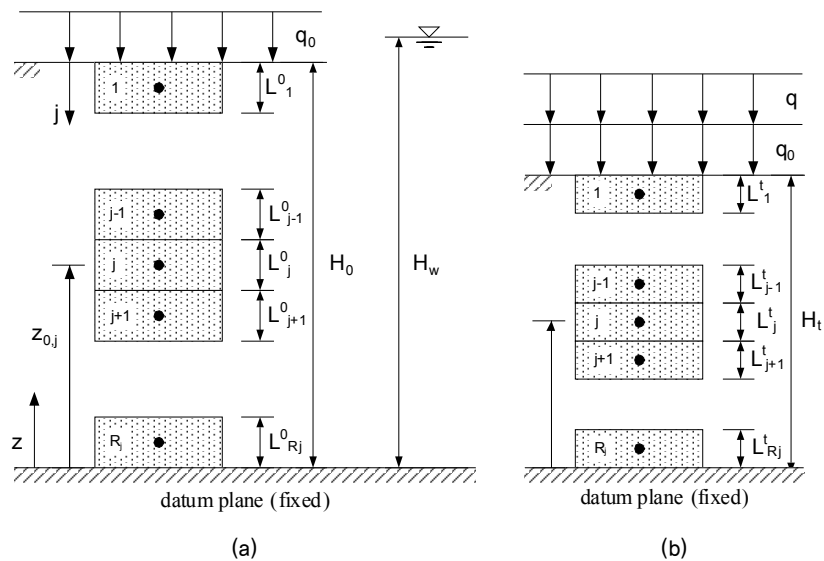


그림 7. 토층의 구성; (a) 초기구성($t=0$), (b) 연직하중 재하 후(after Fox and Berles(1997))

층의 두께 H 가 H_t 로 각 층의 두께도 L_j^0 에서 L_j^t 로 변화한다. 이렇게 압밀층의 두께는 변화하지만 간극수압을 포함한 요소의 정보를 출력하는 데이터 포인트는 항상 요소의 한가운데에 존재하게 되며 이는 압밀 종료시까지 변화하지 않는다. 모든 기하형상과 물성특성은 각 시간 증분에 다다랐을 때 갱신되게 된다.

3.2 해석 프로그램 개발

본 절에서는 지금까지 설명했던 비선형 유한변형압밀이론을 이용한 프로그램 제작에 대해서 설명한다. 프로그램의 제작은 National instrument Co. Ltd.의 프로그램 개발용 소프트웨어인 LabVIEW 8.2를 이용하였다. 이 소프트웨어는 기존의 명령어를 문자로 직접 입력하는 언어(text-based computer language)와는 다르게 기본적으로 제공되는 여러 가지 개체(object)나 사용자가 직접 제작한 서브루틴 혹은 개체를 와이어(wire)라고 불리는 선을 이용해 연결함으로써 개발하는 형식으로, 매우 편리한 사용자 개발환경(user development interface)과 개발 속도가 매우 빠르다는 장점을 갖고 있다.

그림 8은 본 해석프로그램의 순서도를 나타내고 있으며 입력을 시작으로 계산 출력까지 총 9가지 단계의 과정을 거치게 되며 어느 의미로 전처리 과정인 입력과정(input process)과 초기계산(initial computation) 이외의 7개 단계가 루프를 이루어 반복계산을 수행하게 된다. 구성모델에서는 압축성(compressibility)와 투수성(hydraulic conductivity)의 구성관계를 입력한다(SEK.vi, 그림 9). 이는 간극비를 기준으로 각 간극비에 해당하는 유효응력과 이때의 투수계수의 입력으로 이루어지게 되며, 사용자에게 입력 받은 선행압밀

압력 등을 이용하여 기준곡선을 결정하게 된다. 이후로는 이웃한 요소와의 사이에 형성된 전수두와 동수구배의 분포를 구해내고, 시간증분 동안에 흐르는 간극수의 흐름을 이용해 압축층의 연직 압축량을 구해낸다. 계산된 압축량을 통해 새로운 토층의 높이와 간극비를 계산하고 동시에

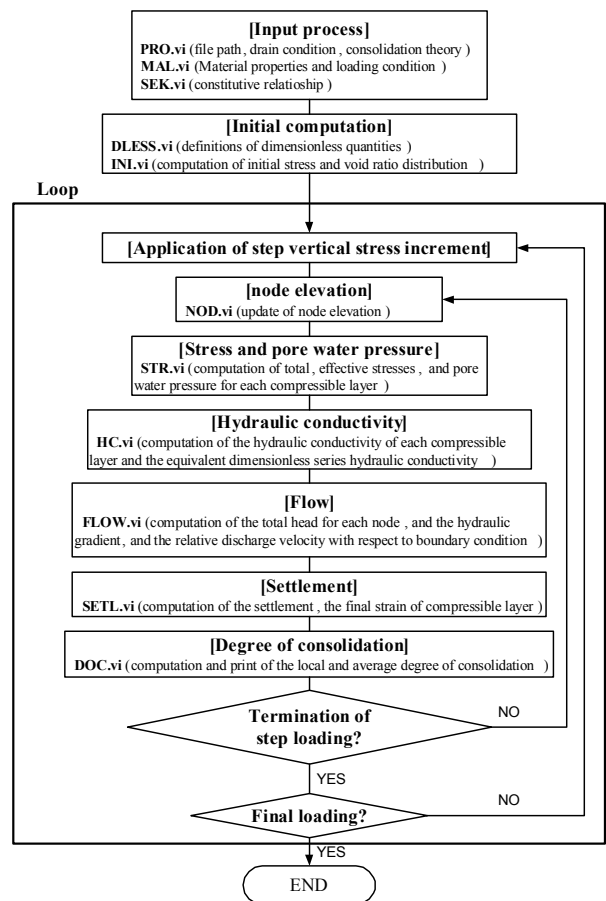


그림 8. 해석 프로그램의 순서도

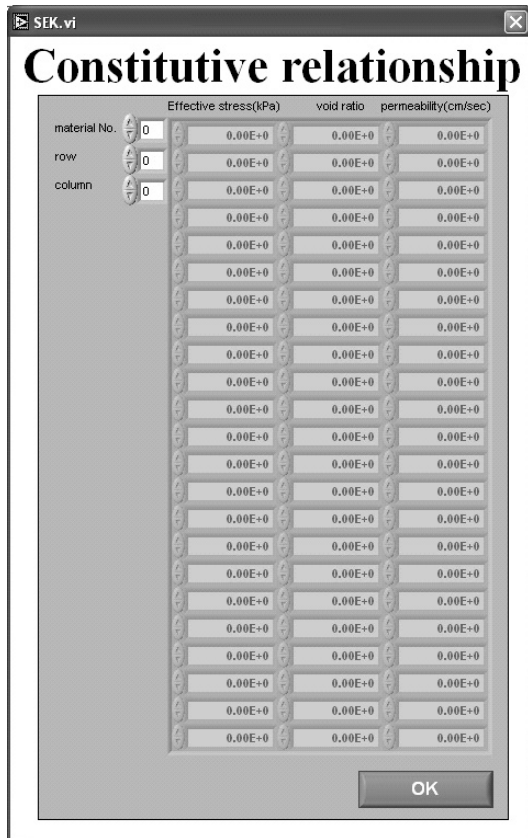


그림 9. 압축성과 투수성에 관한 구성관계의 입력

침하량과 압밀도를 구해낸다. 계산 루프는 최종 재하단계와 재하기간에 다다랐을 경우에 종료시킨다.

4. 해석모델의 검토

본 연구를 통해 개발된 프로그램을 검증하기 위해 실시된 일련의 실내시험결과와 이를 재현하기 위한 수치해석

표 1. 점토시료의 물리적 특성

함수비 (%)	액성한계 (%)	소성한계 (%)	입도구성비(%)		
			모래	실트	점토
98.2	120.3	59.8	2.5	41.2	56.3

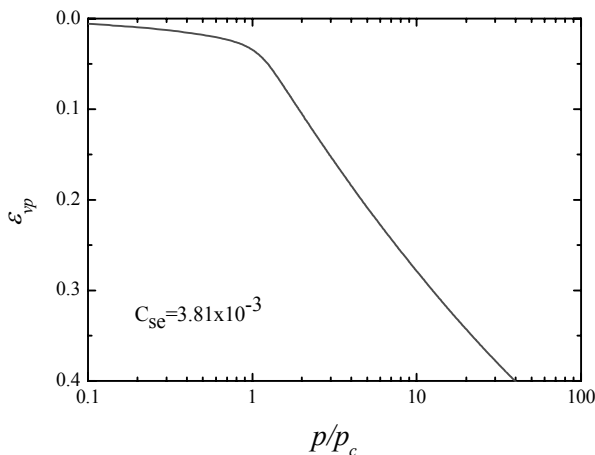
의 결과에 대해 논의한다.

본 연구에서 사용된 시료는 자연 점토이며 표 1은 점토 시료의 물리적 성질을 나타내고 있다. 시료는 교란된 상태에서 채취되었으며 슬러리 상태로 재구성하여 사용하였다. 재구성시료(reconstituted specimen)는 압밀압력 700kPa을 재하하여 방치하는 방법으로 제작하였다.

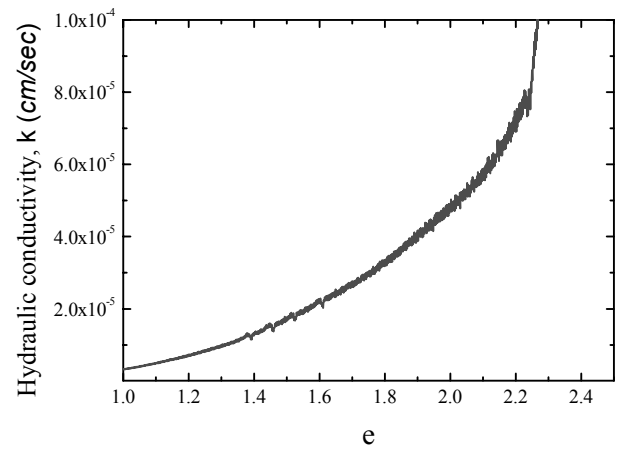
재구성된 시료는 2cm의 높이로 시험 공시체를 작성하여 단계재하 압밀시험(incremental loading test)를 실시하였으며 얻어진 압축곡선을 이용하여 Casagrande방법으로 선형압밀압력을 평가하였다. 시험결과 재구성 시료의 선형압밀압력은 657kPa로 평가되었으며 이 시료를 이용하여 선형압밀압력의 1.15배의 압력수준에서 방치는 장기압밀시험을 실시하였다.

동일한 재구성압밀시료를 이용하여 일정변형률재하(constant rate of strain, CRS) 압밀 시험을 실시하였으며 그림 10은 점소성 변형률 ϵ_{vp} 과 $\log(p/p_c)$ 의 관계로 나타난 기준곡선(a)과 시험결과와 얻어진 간극비-투수계수 관계(b)를 나타내고 있다. 기준곡선 결정에 사용된 C_{se} 값은 3.81×10^{-3} 을 사용하였다. 또한, 그림 11은 일정변형률재하 압밀시험 장치의 전경과 시료 설치 후 광경을 보이고 있다.

그림 12는 일정변형률재하 압밀시험과 장기압밀시험 결과를 이용하여 얻은 선형압밀압력 $p_c(\dot{\epsilon})$ 과 변형률속도 $\dot{\epsilon}$ 의 관계를 도식한 그림이다. 구체적으로 설명하면 먼저 장기 압밀압력시험 결과를 이용하여 특정 변형률속도와 이때의 변형률을 결정하고 그림 10에서 얻은 기준곡선으로부터 해



(a) 대상시료의 기준곡선



(b) 간극비-투수성 관계

그림 10. 일정변형률재하 압밀시험결과

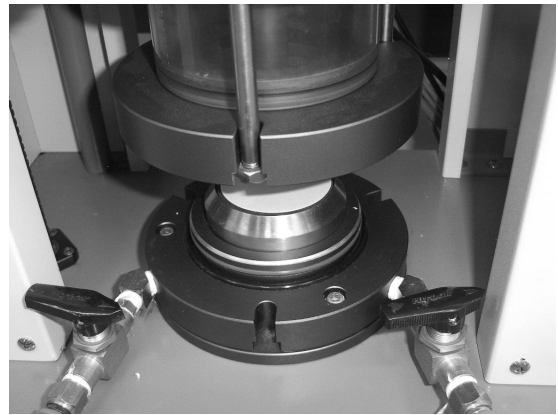


그림 11. 일정변형률재하 압밀시험기 전경 및 시료 설치광경

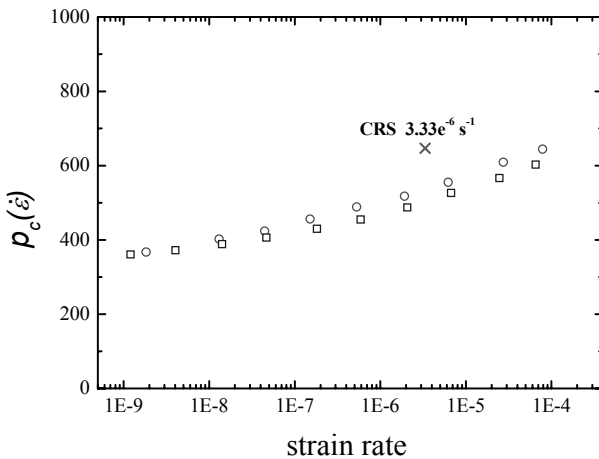


그림 12. 선행압밀압력과 변형률속도와의 관계

당 변형률 속도에서의 압축곡선의 위치를 결정하게 된다. 이때 곡선의 형상은 변화하지 않으며 위치만 변화되므로 곡선의 위치변화로부터 선행압밀압력의 변화를 결정하였다. 또한 그림에서 참고적인 데이터의 확보를 위하여 일정 변형률재하 압밀시험의 결과를 동시에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 장기압밀시험결과와 일정변형률재하 압밀시험결과는 선행압밀압력 $p_c(\dot{\epsilon})$ 과 변형률속도 $\dot{\epsilon}$ 평면의 위치에서 약간의 차이를 보이고 있으며 이는 일정변형률재하 압밀시험의 경우 탄성 변형률과 점소성 변형률이 함께 존재하지만 장기압밀 시험결과는 후자만 존재하기 때문인 것으로 판단하고 있다. 본 연구에서의 관심은 점소성 변형률속도에 있으며 따라서 두 값의 차이는 연구 결과에 영향을 미치지 않는 것이다.

또한 장기압밀시험은 시험결과의 재현성을 확인하기 위하여 2회 실시되었으며 그림 12는 2회의 데이터를 모두 포함하고 있다. 두 시험결과는 매우 유사한 경향을 보이고 있었으며, 따라서 2회의 시험결과를 모두 포함할 수 있는 회귀분석을 실시하여 식 (5)를 구성하기 위한 매개변수를

표 2. 결정된 매개변수

p_c (kPa)	p_{cl} (kPa)	c'_3	c'_4	상관계수
657	342	0.6842	0.1931	0.981

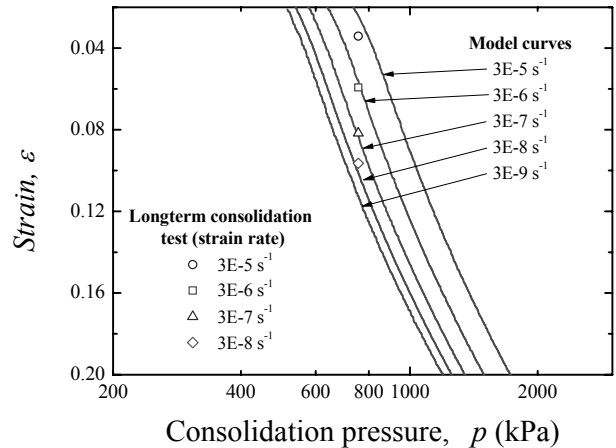


그림 13. 모델화한 압축곡선과 장기압밀시험결과 비교

결정하였다. 표 2에서는 회귀분석결과 얻어진 매개변수를 정리하였다.

그림 13은 장기압밀시험을 본 논문에서 도입한 유한변형압밀이론과 기준곡선 개념을 이용하여 모사한 결과를 나타내고 있다. 수치해석은 장기압밀시험과 동일하게 상하면 배수조건으로 실시하였으며 선행하중의 1.15배까지 단계재하를 실시하고 방치하는 문제로 설정하였다. 그림에서 선으로 표현된 부분은 표 2에 정리된 매개변수를 이용하여 얻어진 모델 곡선을 나타내고 있으며 선행압밀압력의 1.15배(756kPa)에서 실시된 장기압밀시험 결과 얻어진 변형률속도를 함께 도시하였다. 해석결과 두 값 사이에 약간의 차이는 있었지만 각 모델 곡선들은 해당 변형률속도에서 얻은 장기압밀시험 결과를 큰 무리 없이 재현하고 있음을 알 수 있었다. 또한 식 (5)를 통해 알 수 있듯이 c'_3 는 선

행압밀압력의 하한치인 p_{cl} (종축과의 절편)에 밀접한 관계를 갖고 있다는 점과 변형률 속도에 관계없이 거동하는 잠재적인 선형압밀압력의 크기를 나타내며, c_v 는 변형률 속도 의존성의 크기(직선의 기울기)를 나타내는 매개변수다. 이러한 값들은 해당 점토의 고유값일 가능성이 높으며 이에 관해서는 향후 더 많은 연구사례의 축적과 검토가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론 및 향후 연구방향

- (1) 본 연구에서는 매개변수 입력을 생략할 수 있는 구분선형법과 이류좌표계를 이용하여 유한변형 비선형 압밀해석이 가능한 계산프로그램을 개발하였다. 또한, 본 프로그램에서는 구분선형법의 문제점으로 지적되어 온 압축곡선의 유일성 가정을 완화할 수 있도록 기준곡선 개념을 사용하여 곡선의 위치를 결정하였다.
- (2) 본 접근법의 적용성을 평가하기 위하여 실내에서 설계된 실험을 이용하여 비교연구를 수행하였으며 점토의 시간 의존적 거동에 대한 예측이 가능하다는 사실을 일부 확인할 수 있었다.
- (3) 향후 연구과제로서는 현장 적용 등 다양한 조건에 대한 본 접근법의 적용성을 평가할 수 있도록 확장연구를 수행하여야 할 것으로 판단하고 있다. 이러한 수준까지 적용성을 향상시키기 위해 점토의 시간의존적 거동을 잘 모사할 수 있는 초빈배합 시멘트 혼합점토와 분할압밀실험법을 이용하여 추가적인 실내실험 계획을 갖고 있다.

감사의 글

이 논문은 충주대학교 대학구조개혁지원사업비(교육과학기술부 지원)의 지원을 받아 수행한 연구로 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Alfredo, U., John, T. C., and Hon, M. (2002), Limits on a common approximation for layered consolidation analysis, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.128, No.12, pp. 1043~1045.
2. Bjerrum, L. (1973), Problems on soil mechanics and construction on soft clay, *ICSMFE*, Moscow 6, pp. 111~159.
3. Duncan, J. M. (1993), The twenty-seventh Terzaghi lecture-Limitations of conventional analysis of consolidation settlement, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 9, pp. 1333~1359.
4. Fox, P. J. and Berles, J. D. (1997), CS2: A piecewise-linear model for large strain consolidation, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 21, pp. 453~475.
5. Gibson, R. E., England, G. L., and Hussey, M. J. L. (1967), The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays 1. finite nonlinear consolidation of thin homogeneous layers, *Geotechnique*, Vol. 17, pp. 261~273.
6. Gibson, R. E., Schiffman, R. L., and Cargill, K. W. (1981), The theory of one-dimensional consolidation of saturated clay, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 18, pp. 280~293.
7. Imai, G. (1988), A unified theory of one-dimensional consolidation with creep, *12th ICSMFE*, pp. 57~60.
8. Kobayashi, M., Furudoi, T., Suzuki, S. and Watabe, Y. (2005), Modeling of consolidation characteristics of clays for settlement prediction of Kansai International Airport, *Proc. of the symposium on geotechnical aspects of Kansai International Airport*, pp. 65~76.
9. Leroueil, S., Kabaj, M., Tavenas, F., and Bouchard, R. (1985), Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clay, *Geotechnique*, Vol. 35, No. 2, pp. 159~180.
10. McVay, M. C., Townsend, F. C., and Bloomquist, D. (1989), One-dimensional Lagrangian consolidation. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 6, pp. 893~898.
11. Mikasa, M. (1964), *The consolidation of soft clay - A new consolidation theory and its application*, Kagoshima Kenkyujo Publication.
12. Terzaghi, K. (1925), *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage*.
13. Townsend, F. C. and McVay, M. C. (1990), SOA: Large strain consolidation predictions, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 2, pp. 222~243.

(접수일: 2008. 5. 29 심사일: 2008. 8. 13 심사완료일: 2008. 9. 18)