

배수재가 설치된 압축성 지반의 축대칭 비선형 압밀해석

Axisymmetric Nonlinear Consolidation Analysis
for Drainage-Installed Compressible Deposits

김 윤 태* ¹	이 승 래* ²
Kim, Yun-Tae	Lee, Seung-Rae
도 남 영* ¹	이 영 남* ³
Do, Nam-Young	Lee, Young-Nam

Abstract

In order to accelerate the rate of consolidation settlement and to gain a required shear strength for a given soft clay deposit, the preloading technique combined with a vertical drainage system has been widely applied. In this study, the theory of axisymmetric consolidation, which considers the variation of compressibility and permeability during the consolidation process, has been developed. A computer program named AXICON for the analysis of axisymmetric nonlinear consolidation is developed by adopting an explicit finite difference method. Smear and well resistance effects are also considered. The AXICON is capable of analyzing the consolidation behavior of multi-layered deposits and simulates time dependent loading sequence. The results of AXICON are validated with analytical solutions of Hansbo and Barron, and compared with insitu settlements and pore pressures measured in a soft clay deposit.

요 지

연약지반 처리방법으로 압밀을 촉진시키고, 이로 인한 전단강도를 증진시키기 위하여 선행압밀하중 공법과 병행된 배수공법이 널리 사용되어 오고 있다. 본 연구에서는 배수재가 설치된 연약지반의 압밀과정동안에 유발되는 간극비의 감소로 인한 압축성과 투수계수의 변화를 고려할 수 있는 축대칭 비선형 압밀이론을 제안하였다. 제안된 축대칭 비선형 압밀이론을 명백한(ex-plicit) 유한차분법을 적용하여 해석용 프로그램(AXICON)을 개발하였으며 현장지반의 교란효과나 층으로 이루어진 지반을 해석할 수 있도록 보완하였다. 또한 현장지반의 단계적 시공절차를 고려하여 하중을 적용할 수 있도록 하였다. AXICON 해석결과를 기존의 Hansbo와 Barron

*1 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

*2 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

*3 정회원, 현대건설기술연구소 이사

의 해석적인 해와 비교 검토하였으며 현장지반에서 측정된 침하량과 과잉 간극수압의 자료와 비교하였다.

Keywords: Soft Deposit, Vertical Drain, Axisymmetric, Nonlinear Consolidation, Finite Difference Method

1. 서론

배수재(drainage)는 점토지반과 같이 낮은 투수성을 갖는 지반이 매우 두텁게 형성되어 있는 경우에 배수거리를 인위적으로 단축시켜 주므로써 압밀을 촉진시키고, 이로인한 전단강도 증진효과를 얻기 위하여 주로 선행 압밀하중(preloading) 공법과 병행하여 설치된다. 성토등으로 인한 하중 증가로 인하여 유발되는 연약지반의 침하는 압밀침하와 연약지반의 비배수 거동인 흐름(flow)에 의해 유발된 침하로 분류될 수 있다. 넓은 지역에 걸쳐 안전한 성토가 이루어지는 경우에는 일반적으로 압밀에 의한 침하가 주원인이고 비배수 거동에 의한 침하는 거의 무시될 수 있다.(Mesri 등, 1994)

배수재가 압밀과정에 미치는 영향에 대한 최초의 연구는 Kjellman(1948)에 의해 수행되어졌다. Kjellman의 연구는 초기의 수평한 지반상태가 압밀과정 동안에도 수평하게 유지된다는 등변형률(equal strain)에 대한 가정을 기초로 하고 있으며 배수재의 통수능력에 의해 유발되는 배수정 효과(well resistance)와 배수재가 설치되면서 주변지반이 교란되어 수평방향 투수성이 감소되는 교란(smear)효과는 무시하였다.

이후 Barron(1944, 1948)에 의해 배수재가 설치된 지반의 압밀해석에 대한 본격적인 연구가 이루어졌다. Barron은 배수재가 설치된 지반의 거동상태를 자유변형률(free strain)과 등변형률(equal strain) 상태로 가정하여 해석적인 방법으로 압밀도를 구하는 식을 제안하였다. 뿐만아니라 교란효과와 배수정 효과를 고려한 수정된 해 또한 제안하였다. 일반적으로 자유변형률 방법에 의한 해석이 물리적인

로 실제 현장상태와 더 잘 일치된다고 할 수 있으나, 매우 복잡한 형태의 해를 요구하며 자유변형률로 가정한 해와 등변형률로 가정한 해는 거의 유사한 평균압밀도를 산정한다.(Barron, 1948)

한편 Yoshikuni와 Nakando(1974)는 등변형률 상태를 가정하여 배수정 효과를 고려한 엄밀해(rigorous solution)를 구하였으나, Barron의 해와 마찬가지로 복잡하고 Bessel함수를 포함하고 있어 실제 문제에 적용시 실용성이 떨어진다고 할 수 있다. 따라서 Hansbo(1981)는 교란효과에 배수정 효과를 고려하면서도 다른 연구자들에 의해 제안된 해와 비교하여 볼 때 큰 차이를 나타내지 않으며 다른 방법들에 비해 매우 간단한 해석적인 해를 제안하였다. 그러나, 제안된 이들 방법에서는 연직방향의 배수는 무시하고, 반경방향의 배수만을 고려하였다. 또한 Terzaghi의 일차원 압밀이론을 바탕으로 하기 때문에 압밀이 진행되는 동안에 감소되는 간극비로 인하여 투수계수나 압축성(compressibility)이 변화하는 것을 고려하지 않았으므로 비교적 침하가 많이 유발되는 연약점토 지반의 경우에는 현장에서 관측되는 시간-침하 양상을 적절히 예측하기 어렵다.

Mesri와 Lo(1994)는 위 또는 아래의 배수경계층을 가지는 압축성 지반의 일차원 압밀해석 프로그램(ILLICON)을 확장하여, 배수재가 설치된 지반의 수직 및 수평방향의 흐름을 해석하였다. ILLICON에서는 유한변형률(finite strain) 이론을 바탕으로 압축성 지반의 유량의 변화가 체적변화의 비와 같다는 연속방정식으로부터 지배방정식을 간극비에 대한 항으로 표현하였다.

본 논문에서는 위의 단점들을 보완하기 위하

여 압밀과정에서 변화되는 지반의 투수계수를 적절하게 고려할 수 있는 축대칭 비선형 압밀 이론을 바탕으로, 유한차분법을 적용하여 해를 구함으로써 배수재가 설치된 연약지반의 압밀 거동을 예측할 수 있는 보다 효율적이고 실용적인 간편한 방법을 제안하고자 하였다. 뿐만 아니라 실제 현장지반의 조건을 모델할 수 있도록 교란효과, 배수정 효과, 불균등한 초기간극수압, 불균질 지반등을 고려할 수 있도록 하였다. 또한 실제 현장의 단계적 성토과정을 고려할 수 있도록 보완하였으며 현장에서 계측된 거동과 비교하여 제안된 축대칭 비선형 압밀해석 프로그램을 검증하였다.

2. 축대칭 비선형 압밀해석

이차압밀효과를 무시하는 경우 유효응력의 변화에 대한 간극비는 유일한(unique)관계를 가지며(Mesri 등, 1985) 팽창지수(C_c)와 압축지수(C_c)를 사용하여 표현할 수 있다. 또한 간극비의 감소로 유발되는 수평 및 연직방향 투수계수의 감소는 그림 1과 같이 수평 및 연직방향의 투수계수지수(C_{vh} , C_{kv})를 사용하여 고려할 수 있다.

본 연구에서는 배수재가 설치된 압축성 지반의 비선형적인 거동을 해석하기 위하여 Mesri와 Rokhsar(1974)가 제안한 일차원 압밀이론을 근간으로, 압밀과정에서 유발되는 지반의 투수계수 변화를 적절하게 고려할 수 있을뿐

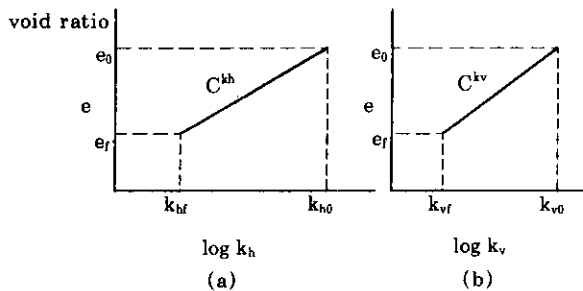


그림 1. 간극비와 수평 및 연직방향 투수계수의 관계

아니라 유효응력과 간극비의 비선형적인 관계를 적절한 압축지수를 도입하여 고려할 수 있는 축대칭 비선형 압밀해석을 수행하였다. 즉 균질하고 완전 포화되어 있는 지반에서 그림 1과 같은 수평 및 연직방향의 투수계수와 간극비의 관계를 가정하였으며 지반의 자중은 무시하고 Darcy의 법칙이 유효하다고 가정하였다.

2.1 연속방정식

배수재는 일반적으로 삼각형이나 사각형의 격자 형태로 설치된다(그림 2). 이때 그림 2에서 하나의 배수재가 영향을 미칠 수 있는 영역을 그림 3과 같이 하나의 실린더로 생각하여 해석을 수행할 수 있다. 실린더내의 임의의 부피요소를 통과하는 물은 수평방향의 흐름과 연직방향의 흐름을 동시에 갖는다고 가정하였다.

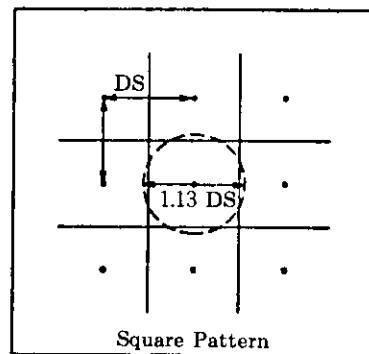
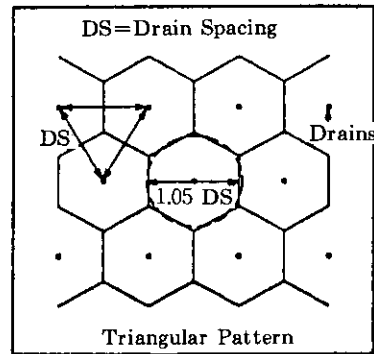


그림 2. 배수재가 설치되는 일반적인 형태와 영향반경

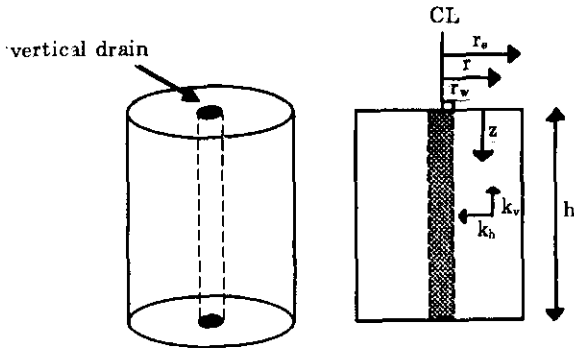


그림 3. 하나의 배수재가 영향을 주는 실린더 지반

따라서 고려된 임의의 부피요소에서 수평방향과 연직방향을 통하여 빠져나가는 유량의 차이가 그 요소의 부피변화와 같다는 가정으로부터 다음과 같은 연속방정식을 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{k_h}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \left(\frac{k_h}{\gamma_w r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, 간극비의 변화에 의한 평균압밀도는 $\mu = (e_0 - e) / (e_0 - e_f)$ 와 같이 정의될 수 있고 압밀진행중에 변하는 수평방향의 투수계수와 연직방향의 투수계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다(그림 1 a, b).

$$k_h = k_{h0} \left(\frac{k_{hf}}{k_{h0}} \right)^\mu = k_{h0} b^\mu \quad (2a)$$

$$k_v = k_{v0} \left(\frac{k_{vf}}{k_{v0}} \right)^\mu = k_{v0} \bar{b}^\mu \quad (2b)$$

과압밀 상태와 정규압밀 상태에 따른 압축성 변화를 고려하기 위하여 현재상태의 유효응력 (p)이 선행압밀하중(p_c)보다 작을 경우, 즉 $p < p_c$ 일 경우에는 간극비와 유효응력의 관계가 다음과 같이 표현되며,

$$e_0 - e = C_r \log \frac{p}{p_0} \quad (3)$$

식 (3)을 유효응력 p 로 다시 표현하면 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있고 임의의 시간에서의 유효응력과 그때의 과잉간극 수압의 합이 유효응력 p 와 같다는 관계로부터 식(5)와 같이 과잉간극수압과 이의 수평 및 연직방향 변화량을 구할 수가 있다.

$$p = p_0 10^{\frac{e_0 - e}{C_r}} = p_0 10^{\frac{\mu(e_0 - e_f)}{C_r}} \quad (4)$$

$$u = p_f - p_0 10^{\frac{\mu(e_0 - e_f)}{C_r}} \quad (5a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} = -p_0 10^{\frac{\mu(e_0 - e_f)}{C_r}} \ln 10 \frac{e_0 - e_f}{C_r} \frac{\partial \mu}{\partial r} \quad (5b)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -p_0 10^{\frac{\mu(e_0 - e_f)}{C_r}} \ln 10 \frac{e_0 - e_f}{C_r} \frac{\partial \mu}{\partial z} \quad (5c)$$

앞에서 유도된 관계식(5)를 식(1)에 대입하면 과압밀지반($p < p_c$ 일 경우)에 대한 시간에 따른 압밀도 방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial r_1} \left[b^\mu 10^{\frac{\mu(e_0 - e_f)}{C_r}} \frac{\partial \mu}{\partial r_1} \right] + \frac{b^\mu}{r_1} 10^{\frac{\mu(e_0 - e_f)}{C_r}} \frac{\partial \mu}{\partial r_1} + \frac{r_0^2}{H^2} \frac{k_{v0}}{k_{b0}} \frac{\partial}{\partial z_1} \left(\bar{b}^\mu 10^{\frac{\mu(e_0 - e_f)}{C_r}} \frac{\partial \mu}{\partial z_1} \right) = \frac{\partial \mu}{\partial T} \quad (6)$$

여기서, T 는 무차원 시간계수이고, r_1 및 z_1 는 무차원 값으로서 각각 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$T = \frac{k_{h0}(1+e_0)t}{\gamma_w r_0^2 a_{v0}}, \quad a_{v0} = \frac{c_r}{2.3p_0},$$

$$r_1 = \frac{r}{r_0}, \quad z_1 = \frac{z}{h} \quad (6a)$$

또한 유효응력이 선행압밀하중보다 커질 경우, 즉 $p_c < p$ 일 경우에는 간극비와 유효응력의 관계가 다음 식(7)과 같이 표현되며,

$$e_0 - e = c_c \log \frac{p}{p_0} + c_c \log \frac{p}{p_c} \quad (7)$$

이식으로부터 임의 시간의 유효응력 p 에 대하여 아래 식(8)과 같이 정리할 수 있고 과압 밀상 상태에서 유도한 것과 마찬가지로 방법으로서 임의 시간에서의 과잉간극수압을 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p = p_c \left(\frac{p_0}{p_c} \right)^{\frac{c_r}{c_c}} 10^{\frac{e_0 - e}{c_c}} = p_c \left(\frac{p_0}{p_c} \right)^{\frac{c_r}{c_c}} 10^{\frac{\mu(e_0 - e)}{c_c}} \quad (8)$$

$$u = p_r - p_c \left(\frac{p_0}{p_c} \right)^{\frac{c_r}{c_c}} 10^{\frac{\mu(e_0 - e)}{c_c}} \quad (9a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} = -p_c \left(\frac{p_0}{p_c} \right)^{\frac{c_r}{c_c}} 10^{\frac{\mu(e_0 - e)}{c_c}} \ln 10 \frac{e_0 - e_r}{c_c} \frac{\partial \mu}{\partial r} \quad (9b)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -p_c \left(\frac{p_0}{p_c} \right)^{\frac{c_r}{c_c}} 10^{\frac{\mu(e_0 - e)}{c_c}} \ln 10 \frac{e_0 - e_r}{c_c} \frac{\partial \mu}{\partial z} \quad (9c)$$

앞에서 유도된 식을 연속방정식 (1)에 대입하면 다음 식(10)과 같은 정규압밀상태($p > p_c$ 일 경우)의 압밀도 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial r_1} \left(b^{\mu} 10^{\frac{\mu(e_0 - e)}{c_c}} \frac{\partial \mu}{\partial r_1} \right) + \frac{b^{\mu}}{r_1} 10^{\frac{\mu(e_0 - e)}{c_c}} + \frac{r_c^2}{H^2} \frac{k_{v0}}{k_{v0}} \frac{\partial}{\partial z_1} \left(\bar{b}^{\mu} 10^{\frac{\mu(e_0 - e)}{c_c}} \frac{\partial \mu}{\partial z_1} \right) = \frac{\partial \mu}{\partial T} \quad (10)$$

여기서, 무차원 시간계수 T 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$T = \frac{k_{v0}(1+e_0)}{r_c^2 \gamma_w a_{vc}} \left(\frac{p_0}{p_c} \right)^{\frac{c_r}{c_c}} t, \quad a_{vc} = \frac{c_r}{2.3 p_c} \quad (10a)$$

2.2 압축성(compressibility) 방정식

지반재료의 시간에 따른 간극비의 변화는 유효응력과 시간에 따른 함수로서 각각 일차압밀과 이차압밀로 구분될 수 있으므로 압축성 방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.(Mesri 등, 1974)

$$\left(\frac{\partial e}{\partial t} \right) = \left(\frac{\partial e}{\partial p} \right)_i \frac{\partial p}{\partial t} + \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_v \quad (11)$$

여기서, $(\partial e / \partial p)_i$ 는 유효응력의 변화에 의한 간극비의 감소를 나타내고, $(\partial e / \partial t)_v$ 는 주어진 유효응력에 대하여 시간의 변화에 따른 간극비의 변화(이차압밀효과)를 나타낸다.

유효응력의 변화에 따른 간극비의 변화는 식(3)과 (7)로부터 구할 수가 있고,

$$p < p_c \text{ 일 경우, } \left(\frac{\partial e}{\partial p} \right)_i = -0.434 c_c \frac{1}{p} \quad (12a)$$

$$p > p_c \text{ 일 경우, } \left(\frac{\partial e}{\partial p} \right)_i = -0.434 c_c \frac{1}{p} \quad (12b)$$

시간의 변화에 따른 간극비의 변화는 압밀도로부터 다음과 같이 구할 수가 있으며,

$$\Delta e = \mu c, \quad \Delta \log t \quad (13a)$$

$$\left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_v = -0.434 \mu c \frac{1}{t} \quad (13b)$$

유효응력과 간극수압의 관계로부터 다음과 같은 관계식을 얻을 수가 있다.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{\partial u}{\partial t} \quad (14)$$

위의 관계식들(12), (13) 및 (14)를 식(11)에 대입하면 아래와 같은 과잉간극 수압에 대한 방정식을 얻을 수 있다.

$$p < p_c \text{ 일 경우, } \frac{\partial u_1}{\partial T} = \frac{p_0}{0.434 c_c \Delta p} 10^{\frac{\mu(e_0 - e)}{c_c}} \{ 0.434 c_c \frac{\mu}{T} - (e_0 - e_r) \frac{\partial \mu}{\partial T} \} \quad (15)$$

$$p > p_c \text{ 일 경우, } \frac{\partial u_1}{\partial T} = \frac{p_0}{0.434 c_c \Delta p} \left(\frac{p_0}{p_c} \right) 10^{\frac{\mu(e_0 - e)}{c_c}} \{ 0.434 c_c \frac{\mu}{T} - (e_0 - e_r) \frac{\partial \mu}{\partial T} \} \quad (16)$$

여기서, $\Delta p = p_r - p_0$ 이고 $u_1 = u / \Delta p$ 로서 무차원화된 과잉간극수압을 나타낸다.

2.3 유한차분법에 의한 축대칭 비선형 압밀 해석 프로그램(AXICON)

앞절에서 제안된 축대칭 비선형 압밀 지배방

정식을 바탕으로 명백한(explicit) 유한차분법을 이용하여 해를 구하는 해석 프로그램을 개발하였다. 명백한 유한차분법은 요소의 크기와 시간단계의 크기에 따라 민감한 결과를 주므로

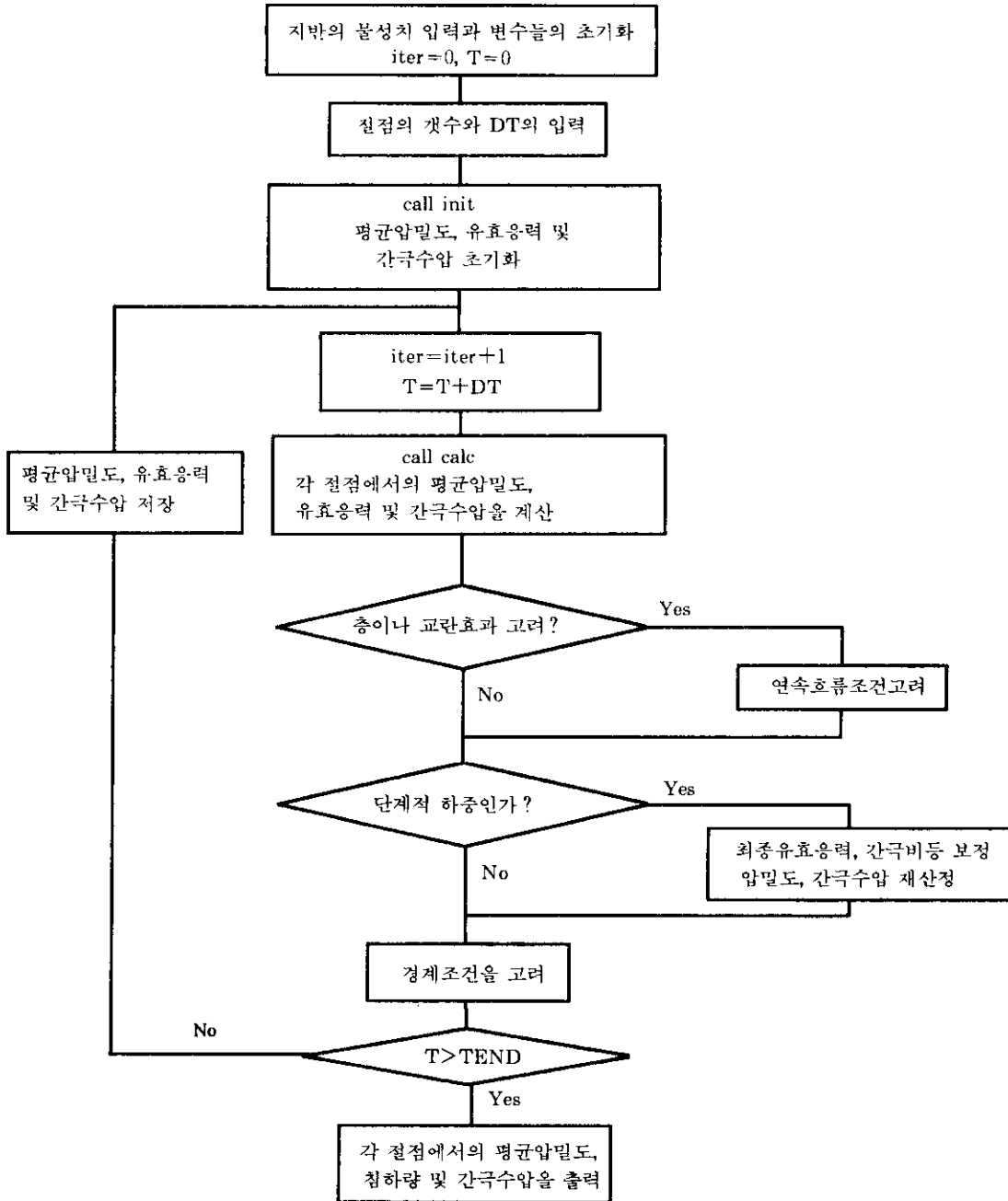


그림 4. 개발된 축대칭 비선형 압밀해석 프로그램의 흐름도

프로그램의 수렴과 안정성을 확보할 수 있는 요소의 크기와 시간단계의 크기를 제한하여 사용해야 한다. 본 프로그램에서는 4차의 Runge-Kutta 방법(Chapra 등, 1990)을 적용하여 해석하였으며 Runge-Kutta 방법을 사용하지 않은 방법과 비교할 때에 같은 정확성을 주면서 거의 3~4배의 계산시간을 단축시킬 수가 있다.

개발된 축대칭 비선형 압밀해석이론을 유한차분법으로 해석하기 위한 흐름도는 그림 4와 같으며, 배수재가 설치된 하나의 실린더 지반을 그림 5와 같은 요소망으로 작성하여 해석할 수 있다. 이때 경계조건으로는 배수재가 설치된 지점에서 연약지반과 배수재의 상대적인 투수계수를 고려하여 완전배수로 가정하거나 배수정 효과를 고려하기 위하여 배수재 자체의 투수계수가 고려될 수 있으며 흐름에 대한 경계조건으로 실린더 벽과 불투수층에서의 흐름을 각각 $\partial u / \partial r = 0$ 와 $\partial u / \partial z = 0$ 으로 적용할 수 있다. 초기조건은 하중증가분에 따라 모두 같은 상태의 초기 과잉간극수압으로 가정하거나 실제 현장상태를 고려한 초기 간극수압 형태를 가정할 수 있다.

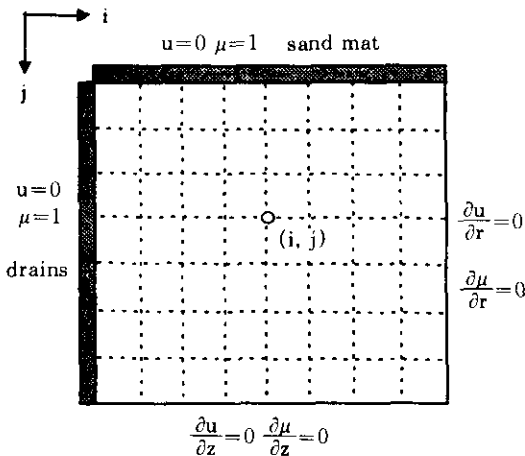


그림 5. 유한차분 해석요소망

3. 교란효과 및 층으로 이루어진 비균질 지반의 해석

3.1 비균질 지반사이에서의 연속흐름조건

연약지반위에 설치되는 배수재는 설치시에 주변지반을 교란시켜 교란영역이 발생하므로 압밀속도를 감소시킨다. 뿐만아니라 현장지반은 일반적으로 물성치가 다른 여러개의 층으로 이루어져 있다. 이와 같은 현장지반의 비균질성을 고려하기 위하여 각영역 경계층에서의 연속흐름 조건을 적용함으로써 개발된 프로그램 (AXICON)을 보완하였다.

그림 6에서와 같이 i 절점의 왼쪽은 교란영역이고 오른쪽은 교란되지 않은 영역이며, j 절점의 위쪽과 아래쪽은 서로 다른 층으로 이루어진 비균질한 지반이라고 가정하였다. 이때 각 영역에 대한 투수계수는 간략하게 식(17)과 같이 표현하였다.

$$\begin{aligned} kv_{11} &= kv(i-1, j-1), \\ kh_{11} &= kh(i-1, j-1) \end{aligned} \quad (17a)$$

$$\begin{aligned} kv_{12} &= kv(i+1, j-1), \\ kh_{12} &= kh(i+1, j-1) \end{aligned} \quad (17b)$$

$$\begin{aligned} kv_{21} &= kv(i-1, j+1), \\ kh_{21} &= kh(i-1, j+1) \end{aligned} \quad (17c)$$

$$\begin{aligned} kv_{22} &= kv(i+1, j+1), \\ kh_{22} &= kh(i+1, j+1) \end{aligned} \quad (17d)$$

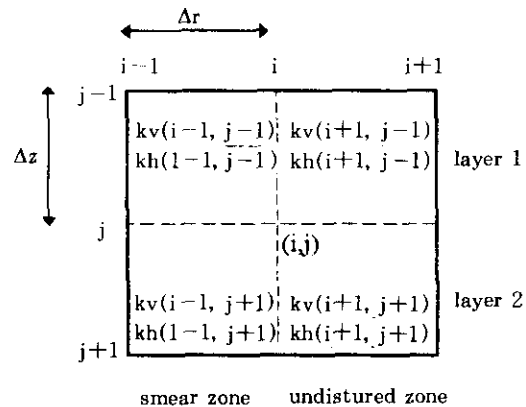


그림 6. 교란영역 및 서로 다른 층으로 이루어진 지반

그림 6에서 지반 물성치 변화의 경계점인 (i, j) 절점에서의 평균 압밀도에 대한 반경방향 (r)의 변화량은 식(18c)와 같이 (i, j) 절점의 윗부분에서 흐름과 아랫부분에서 흐름의 평균 값과 같다고 가정하여 구할 수 있다. 마찬가지로 방법으로 연직방향(z)에 대한 압밀도의 변화량도 유사한 방법으로 구할수가 있다(식 19c).

$$\left(kh \frac{\partial \mu}{\partial r}\right)^{\text{upper}} = \frac{kh12\mu(i+1, j) - kh11\mu(i-1, j)}{r(i+1) - r(i-1)} \quad (18a)$$

$$\left(kh \frac{\partial \mu}{\partial r}\right)^{\text{lower}} = \frac{kh22\mu(i+1, j) - kh21\mu(i-1, j)}{r(i+1) - r(i-1)} \quad (18b)$$

$$kh \frac{\partial \mu}{\partial r} = \frac{1}{2} \left\{ \left(kh \frac{\partial \mu}{\partial r}\right)^{\text{upper}} + \left(kh \frac{\partial \mu}{\partial r}\right)^{\text{lower}} \right\} \quad (18c)$$

$$\left(kv \frac{\partial \mu}{\partial z}\right)^{\text{left}} = \frac{kv21\mu(i, j+1) - kv11\mu(i, j-1)}{z(j+1) - z(j-1)} \quad (19a)$$

$$\left(kv \frac{\partial \mu}{\partial z}\right)^{\text{right}} = \frac{kv22\mu(i, j+1) - kv12\mu(i, j-1)}{z(j+1) - z(j-1)} \quad (19b)$$

$$kv \frac{\partial \mu}{\partial z} = \frac{1}{2} \left\{ \left(kv \frac{\partial \mu}{\partial z}\right)^{\text{left}} + \left(kv \frac{\partial \mu}{\partial z}\right)^{\text{right}} \right\} \quad (19c)$$

또한 압밀도에 대한 반경방향 및 연직방향의 2차 변화량도 마찬가지로 각각 식(20c)와 식(21c)와 같이 나타낼 수가 있다.

$$\left(kh \frac{\partial^2 \mu}{\partial r^2}\right)^{\text{upper}} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{kh11}{(r(i) - r(i-1))^2} + \frac{kh12}{(r(i+1) - r(i))^2} \right\} \left\{ \frac{2kh21}{(kh11 + kh12)} \mu(i-1, j) + \frac{2kh12}{(kh11 + kh12)} \mu(i+1, j) - 2\mu(i, j) \right\} \quad (20a)$$

$$\left(kh \frac{\partial^2 \mu}{\partial r^2}\right)^{\text{lower}} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{kh21}{(r(i) - r(i-1))^2} + \frac{kh22}{(r(i+1) - r(i))^2} \right\} \left\{ \frac{2kh21}{(kh21 + kh22)} \mu(i-1, j) + \frac{2kh22}{(kh21 + kh22)} \mu(i+1, j) - 2\mu(i, j) \right\} \quad (20b)$$

$$kh \frac{\partial^2 \mu}{\partial r^2} = \frac{1}{2} \left\{ \left(kh \frac{\partial^2 \mu}{\partial r^2}\right)^{\text{upper}} + \left(kh \frac{\partial^2 \mu}{\partial r^2}\right)^{\text{lower}} \right\} \quad (20c)$$

$$\left(kv \frac{\partial^2 \mu}{\partial z^2}\right)^{\text{left}} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{kv11}{(z(j) - z(j-1))^2} + \frac{kv21}{(z(j+1) - z(j))^2} \right\} \left\{ \frac{2kv11}{(kv11 + kv21)} \mu(i, j-1) + \frac{2kv21}{(kv11 + kv21)} \mu(i, j+1) - 2\mu(i, j) \right\} \quad (21a)$$

$$\left(kv \frac{\partial^2 \mu}{\partial z^2}\right)^{\text{right}} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{kv12}{(z(j) - z(j-1))^2} + \frac{kv22}{(z(j+1) - z(j))^2} \right\} \left\{ \frac{2kv12}{(kv12 + kv22)} \mu(i, j-1) + \frac{2kv22}{(kv12 + kv22)} \mu(i, j+1) - 2\mu(i, j) \right\} \quad (21b)$$

$$kv \frac{\partial^2 \mu}{\partial z^2} = \frac{1}{2} \left\{ \left(kv \frac{\partial^2 \mu}{\partial z^2}\right)^{\text{upper}} + \left(kv \frac{\partial^2 \mu}{\partial z^2}\right)^{\text{lower}} \right\} \quad (21c)$$

위에서 구한 식 (18), (19), (20) 및 (21)을 2.1절에서 구한 압밀도 방정식에 대입하면 경계부분 (i, j)에서의 압밀도를 구할 수가 있으며, 여기서 구한 압밀도로부터 과잉간극수압에

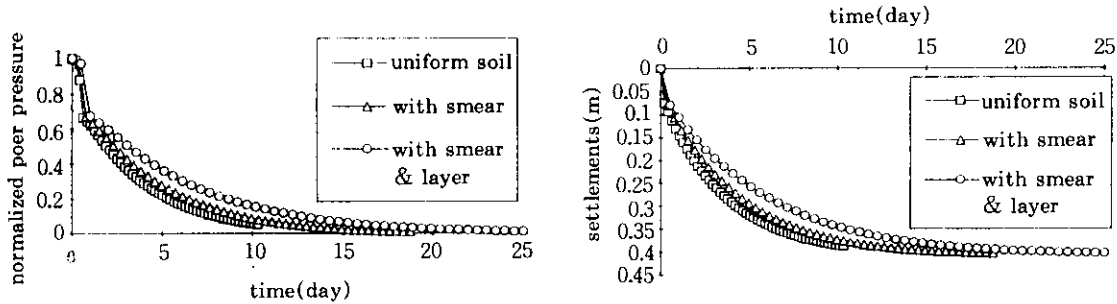
대한 지배방정식을 풀면 그 지점의 간극수압을 구할 수가 있다.

균질한 지반과 교란효과만 있는 지반, 교란 및 층으로 이루어진 지반에서 다른 물성치는

모두 같고, 단지 투수계수값만 표 1과 같이 차이가 난다고 가정한 경우에 AXICON을 사용하여 해석한 결과를 그림 7에 도시하였다. 배수재를 설치할 때 발생하는 교란효과에 의해 수평방향의 투수계수만 감소하였다고 가정한 지반은 교란이 발생하지 않은 지반보다 과잉간극수압이 소산속도가 늦어지게 되므로 압밀에 필요한 시간이 많이 걸리고 최종 침하량에 도달하는 시간도 길어진다. 또한 투수계수가 작은 층이 있는 경우에도 과잉간극수압의 소산이 늦어지게 되므로 압밀속도가 감소하게 되어 최종 압밀도에 도달하는 시간이 길어지게 되는 것을 알 수 있다.

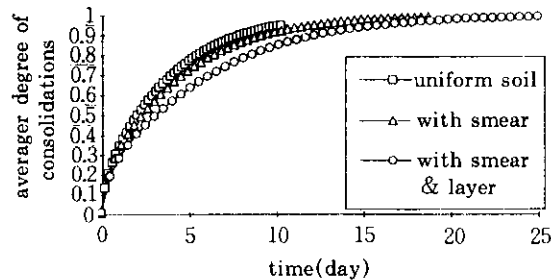
표 1. AXICON에 사용된 대상지반의 투수계수(m/day)

case	투수계수
uniform soil	$k_h=0.01, k_v=0.005$
with smear	교란영역 : $k_h=0.001, k_v=0.005$ 비교란 영역 : $k_h=0.01, k_v=0.005$
with smear & layer	층 1 교란영역 : $k_h=0.001, k_v=0.005$ 비교란 영역 : $k_h=0.01, k_v=0.005$ 층 2 교란영역 : $k_h=0.005, k_v=0.0025$ 비교란 영역 : $k_h=0.005, k_v=0.0025$



(a) 간극수압의 변화

(b) 침하량의 변화



(c) 압밀도의 변화

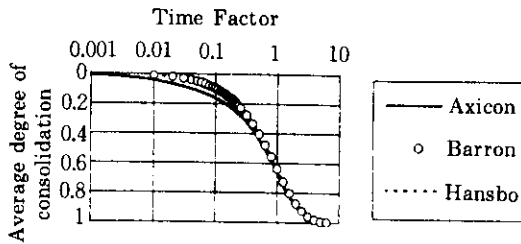
그림 7. 교란 및 층으로 이루어진 지반에서의 해석결과

3.2 Hansbo 및 Barron의 해석적인 해와의 비교

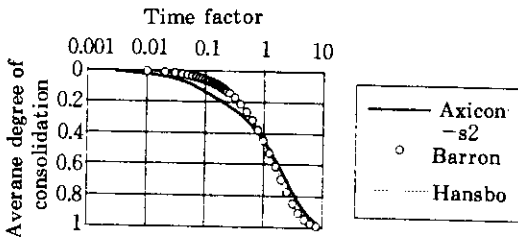
개발된 축대칭 압밀해석 프로그램(AXICON)의 해석결과와 Hansbo 및 Barron의 해석적인 해와 비교하였다. 배수재와 지반의 투수

계수비는 $k_w/k_h=203,000$, 교란된 영역과 지반의 투수계수비는 $k_s/k_h=1/3$ 로 가정하였으며 Hansbo와 Barron의 가정에서와 같이 AXICON 해석시 연직방향의 배수는 무시($k_v \approx 0$)하였다.

그림 8은 교란효과가 없을 때($s=1$)와 교란 효과가 있을 때($s=2$)의 결과를 나타낸다. Hansbo와 Barron의 해석적인 해는 거의 일치하는 결과를 주며 연직방향의 배수가 무시된 AXICON 해석 결과는 초기에는 비교적 빨리 압밀이 진행되지만 시간이 지남에 따라 해석적인 결과와 비슷한 결과를 나타내고 있다.



(a) 교란효과가 없을 때($s=1$) 기존의 해와의 비교



(b) 교란효과가 있을 때($s=2$) 기존의 해와의 비교

그림 8. Hansbo 및 Barron의 해석적인 해와의 비교

4. 초기 간극수압 분포와 단계하중에 대한 영향

4.1 초기 간극수압 분포의 영향

그림 10은 초기 간극수압의 분포를 Barron (1948)이 제안한 것(그림 9)과 같이 배수경계에서는 0이고 배수재의 거리에 따라 포물선 형태로 발생한다고 가정하여 AXICON 해석을 수행한 결과이다. 이와 같은 간극수압을 초기

입력치로 가정한 경우(modified)에는 균등한 간극수압 분포를 초기 입력치로 가정한 경우(uniform)와 비교하여 볼 때 초기 압밀단계에서는 약간 증가된 압밀도를 산정하나 시간이 지남에 따라 거의 비슷한 결과를 나타낸다(그림 10a). 또한 간극수압은 배수재 근처에서 초기에 주어진 입력치에 따라 약간 차이나는 결과를 주며(그림 10b) 압밀에 의하여 발생하는 침하량은 그림 10c와 같이 포물선 형태의 간극수압 분포를 가정한 경우가 균등한 간극수압 분포를 가정한 경우보다 침하량이 약간 많이 발생하나 배수가 많이 일어난 배수재 근처에서는 최종 압밀도의 크기가 같기 때문에 같은 침하량을 산정한다.

그림 10의 결과로 볼 때 Barron이 제안한 초기 간극수압 분포를 초기의 조건으로 입력하여 해석을 할 경우와 균등한 초기 간극수압을 입력한 경우 비교적 비슷한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 초기 간극수압의 분포가 균등한 경우와 비교하여 많이 차이가 나는 경우에는, 특히 압밀초기에 상당히 다른 침하량이나 압밀도를 나타낼 수 있을 것이다.

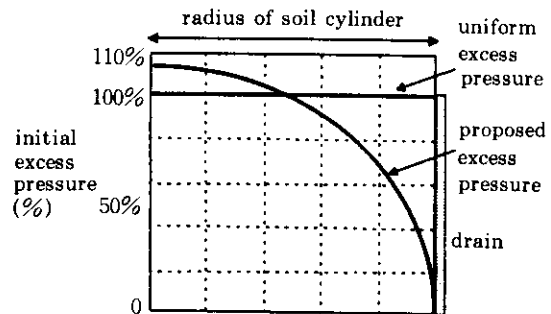
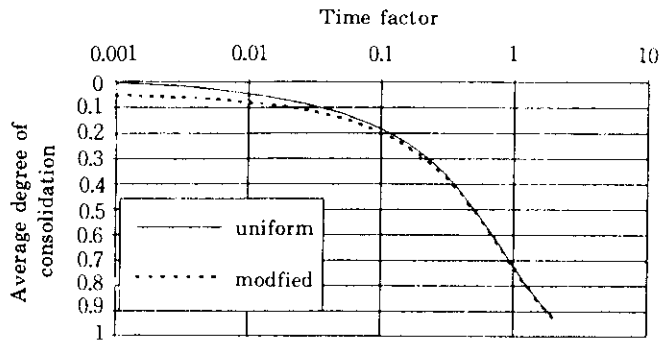
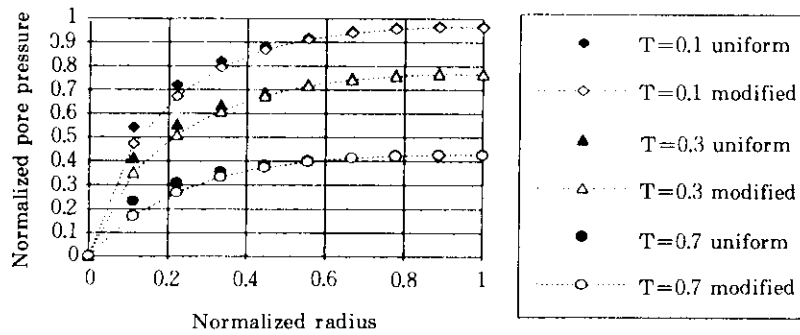


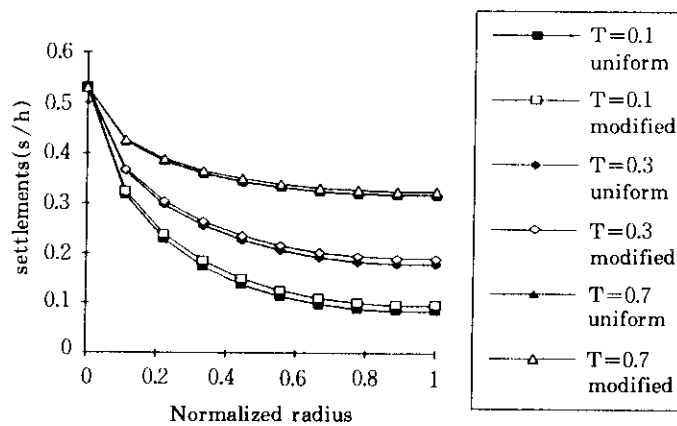
그림 9. Barron 이 제안한 초기 간극수압 분포



(a) 간극수압의 초기 분포에 따른 압밀도



(b) 간극수압의 초기 분포에 따른 임의 시간의 간극수압



(c) 간극수압의 초기 분포에 따른 임의 시간의 침하량

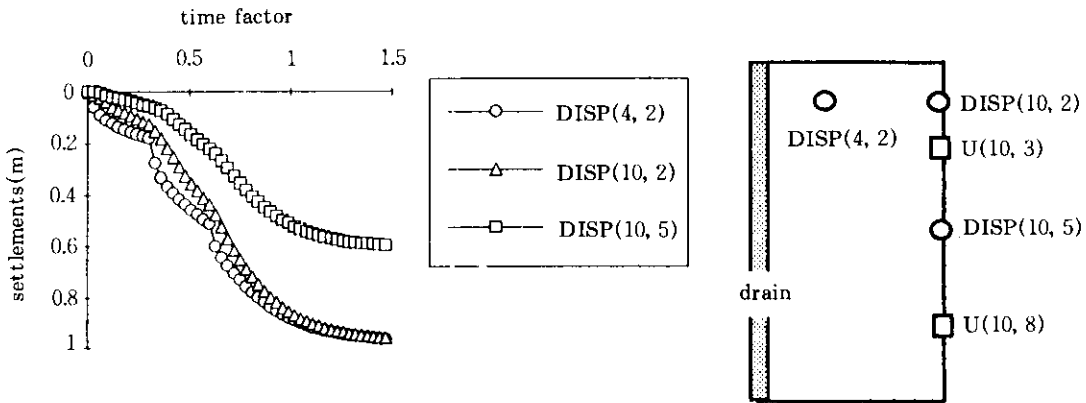
그림 10. 수정된 간극수압의 초기 입력치 대한 압밀도와 간극수압

4.2 단계하중에 의한 영향

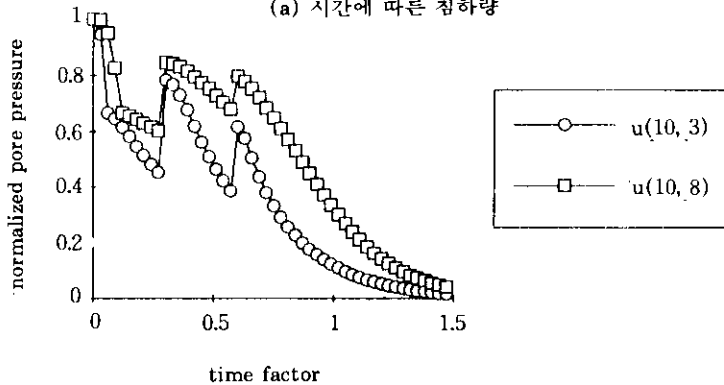
배수재가 설치된 연약지반을 선행압밀 하중 공법과 병행하여 개량하고자 할 때에 단계적인 성토과정이 이루어지는 경우가 있다. 그림 11은 이와같은 단계적인 하중에 의한 침하량을 AXICON을 사용하여 해석한 결과를 나타내고 있다. 임의시간에 단계하중(Δp)가 가해지면 그 단계의 최종 유효응력은 $p_r \leftarrow p_r + \Delta p$ 로 산정되고, 최종단계의 간극비는 $e_r \leftarrow e_r - \Delta e$ 로 계산된다.

그림 11은 시간계수가 $T=0.3$ 일 때에 Δ

$p=100\text{kPa}$ 이 주어지고 $T=0.6$ 일 때에 또다시 $\Delta p=50\text{kPa}$ 로 단계하중이 작용할 경우의 시간에 따른 침하량과 간극수압의 소산형태를 나타내고 있다. 절점(4, 2)가 절점(10, 2)보다 배수재와 가까워서 과잉간극수압의 소산이 빨리 일어나므로 임의의 시간계수에서 침하량이 크게 산정되나 최종 침하량은 초기에 과잉간극수압이 균등하게 발생된다고 가정하였으므로 같다. 과잉 간극수압은 시간이 지남에 따라 감소하다가 단계하중이 재하되는 시점에서 하중의 크기에 비례해서 증가하였다가 소산된다.



(a) 시간에 따른 침하량



(b) 시간에 따른 간극수압의 소산

그림 11. 단계하중에 대한 시간에 따른 침하량과 간극수압

5. 실제 현장계측치와의 비교

개발된 축대칭 비선형 압밀해석 프로그램

(AXICON)을 검증하기 위하여 SKA-EDE-BY 시험성토 자료(Hansbo, 1960; Lo, 1991; Mesri 등, 1994)와 비교하였다. 해석에 사용된

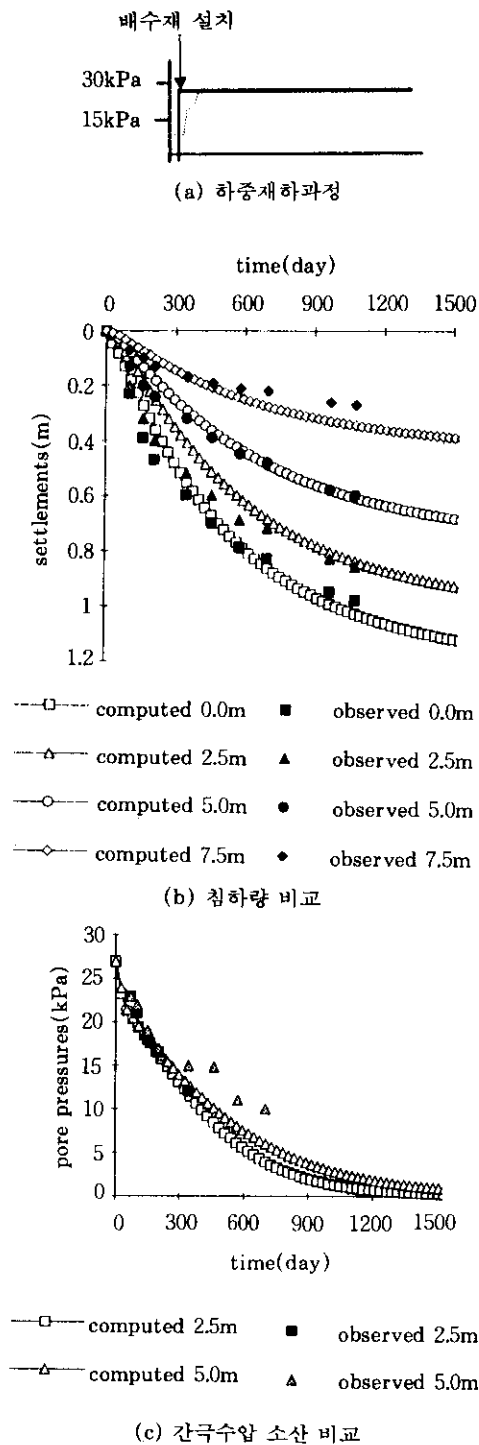


그림 12. Area II에 대한 AXICON 해석결과와
계측된 침하량 및 간극수압

장소는 Area II 지역이고, 이 지역에 대한 설명
과 사용된 물성치는 표 2와 같다.

실제 지반에서는 그림 12a와 같이 하중이 재
하되고(점선) 배수재는 며칠뒤에 설치되었으
나, AXICON 해석시에는 배수재가 설치되어
있다는 가정아래 초기에 전 해석영역에 대하여
성토하중이 균등하게 영향을 준다고 가정하였
다(실선). 그림 12b에서 계측이 이루어진 약
1100일까지의 침하량 결과를 비교하여 볼 때
초기에는 현장의 침하량이 예측된 침하량보다
약간 크게 산정되었다. 이것은 현장의 계측자
료에는 성토시에 발생하는 지반의 즉시침하나
비배수 거동에 대한 영향이 포함되어 관측되었
기 때문이라고 사료된다. 압밀이 진행됨에 따
라 7.5m의 침하량은 다소 과다하게 예측하나
지표면과 2.5m, 5.0m의 깊이에서의 침하량은
비교적 잘 예측한다. 이는 해석에 사용된 층3
의 지반물성치가 실제 현장지반과 다소 다르기
때문이라고 사료된다. 과잉 간극수압의 소산은
현장의 계측자료보다 더 빨리 소산되는 경향을
보인다.

6. 결론

하나의 배수재를 중심으로 한 실린더 지반에
서 반경방향과 연직방향으로 과잉간극수압이
소산되어 압밀이 일어나는 압축성 지반의 거동
을 해석하기 위하여 축대칭 비선형 모델을 제
안하였다. 제안된 축대칭 비선형 압밀해석 이
론을 바탕으로 유한차분법을 적용하여 대상지
반을 해석하기 위한 전산 프로그램(AXICON)
을 개발하였다.

개발된 AXICON은 지반의 유효응력과 간극
비의 비선형적인 관계를 고려할 수 있으며 투
수계수의 시간에 따른 변화를 고려할 수 있다.
뿐만아니라 배수재의 설치로 인한 교란효과를
고려할 수 있으며 층으로 이루어진 지반에도
적용이 가능하다. 또한 실제 현장지반의 초기
간극수압 분포를 알 수 있으면 이와 같은 간극
수압의 분포를 가정하여 해석할 수도 있으며,

단계적 하중이 작용하는 배수재가 설치된 지반의 거동을 예측할 수가 있다. 개발된 해석 방법을 적용한 해석 결과를 기존의 해석적인 방법들에 의해 얻어진 결과들과 비교 검토함으로써 개발된 프로그램을 검증하였으며, 실제현장지

반에서 측정된 침하량과 간극수압을 해석결과와 비교한 결과 침하량은 비슷한 경향을 얻을 수가 있었으나 간극수압은 과소 평가하는 경향을 보였다.

표 2. Area II에 대한 지반물성치

Area II	
배수재의 형식	sand drains
배수재의 간격(m)	1.5
최대 성토 두께(m)	1.5
연약지반층의 깊이(m)	12
AXICON 해석에 사용된 층의 수	3
해석에 사용된 지반 물성치	
층 1 깊이 : 0~2m	$C_c = 1.5, C_r = 0.17, C_s/C_c = 0.05$ $k_{v0} = 1.3e-4 \text{m/day}, k_{v0}/k_{h0} = 1, C_{kv} = 1.3, C_{kh} = 1.3$ $e_0 = 2.6, p_0 = 10.0 \text{kPa}, p_c = 80.0 \text{kPa}$
층 2 깊이 : 2~4m	$C_c = 1.75, C_r = 0.17, C_s/C_c = 0.05$ $k_v = 1.04e-4 \text{m/day}, k_{v0}/k_{h0} = 1, C_{kv} = 1.2, C_{kh} = 1.2$ $e_0 = 2.5, p_0 = 25.0 \text{kPa}, p_c = 30.0 \text{kPa}$
층 3 깊이 : 4~12m	$C_c = 1.54, C_r = 0.17, C_s/C_c = 0.05$ $k_{v0} = 8.64e-5 \text{m/day}, k_{v0}/k_{h0} = 1, C_{kv} = 0.7, C_{kh} = 0.7$ $e_0 = 1.8, p_0 = 50.0 \text{kPa}, p_c = 55.0 \text{kPa}$

참고 문헌

- Barron, R.A.(1994), "The influence of drain wells on the consolidation of fine-grained soils", Diss. Providence US Engrg. Office.
- Barron, R.A.(1948), "Consolidation of fine-grained soils by drain wells", Trans. ASCE, Vol.113., paper No. 2346, pp.718~742
- Chapra, S.C. and Canale, R.P.(1990), Numerical Methods for Engineers, McGraw-Hill International Editions, 2nd Ed. pp596~605
- Hansbo, S.(1960), "Consolidation of Clay, with Special Reference to Influence of Vertical Sand Drains", Proc. Swedish Geotechnical Institute No. 18, 160pp.
- Hansbo, S.(1981), "Consolidation of fined-grained soils by prefabricated drains", paper 12/22: Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Stockholm, Sweden, Vol. 3, pp. 667~682
- Kjellman, W.(1948) "Consolidation of fine-grained soils by drain wells", Trans. ASCE, Vol. 113, pp.748~751
- Lo, D.O.K(1991), "Soil Improvement by vertical drains", Ph.D. thesis, pp. 1~279
- Mesri, G. and Choi, Y.K.(1985), "Settlement Analysis of Embankment on soft clays", ASCE, Vol. 111, GT 4, pp.441~464
- Mesri, G. and Rokhsar, A.(1974), "Theory of consolidation of soils", J. Soil Mech. Found.

- Eng., ASCE, Vol. 100, GT8, pp.889~904
10. Mesri, G., Lo, D.O.K. and Feng, T.W.(1994), "Settlement of Embankments on Soft Clays", Geotechnical Special Publication No. 40, pp. 8~56
 11. Yoshikuni, H. & Naganodo, H.(1974), "Consolidation of soils by vertical drain wells with finite permeability", Jap. Soc. Soil Mech. Found. Engrg. Vol., 14, No2, pp. 35~46

(접수일자 1995. 7. 20)