

선행재하 공법 설계를 위한 전문가 시스템

Expert System for the Design of the Preloading Method

김 병 일*1

Kim, Byoung-Il

김 명 모*2

Kim, Myoung-Mo

Abstract

Design practice of the preloading method, which is one of the most used ground improvement methods, includes quite complicated problems, especially when the draining facilities such as sand drain piles are to be considered. But, such complicated problems can be easily handled once an expert system is developed. The expert system is an interactive computer program which has just succeeded in commercial application. It is a new field of CAE(computer aided engineering), which has developed on application of geotechnical problems in recent years

In this study, the expert system which gives practical assistance to engineers is developed by building the knowledge base for the preloading method with vertical drains. In this study, an expert system is built by using CLIPS as a development tool. And the expert system is developed under the workstation environment using UNIX OS.

요 지

주로 매립 지역에 적용되는 선행재하 공법은 가장 널리 사용되고 있는 지반개량 공법 중의 하나로서, 복잡다단한 설계과정을 포함하고 있는데, 특히 모래말뚝 공법과 같은 배수 공법이 병용될 때는 더욱 더 복잡해진다. 그러나 이와같이 복잡한 설계 과정도 일단 전문가 시스템화 해 놓으면 사용자가 쉽게 설계할 수 있다. 전문가 시스템은 상업적 실용화에 성공한 대화식 컴퓨터 프로그램으로 최근 몇년사이에 지반 공학적 문제들에도 응용되기 시작한 새로운 CAE(computer aided engineering)분야 중의 하나이다.

이 논문에서는 배수 공법을 포함하는 선행재하 공법에 관한 지식베이스를 구축하여 공학자와 관련 기술자들에게 실질적인 도움을 주는 시스템을 개발하였다. 이 연구에서 전문가 시스템은 CLIPS를 사용하여 구축하였으며, Workstation환경에서 개발되었다.

*1: 정희원, 서울대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*2: 정희원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

1. 서론

인류 문명의 발달과 함께 토지에 대한 수요가 매년 계속해서 증가하고 있으나, 이용할 수 있는 토지는 극히 제한되어 있기 때문에, 이제까지는 이용할 수 없었던 악조건의 지반이나 해안 매립등을 통하여 새롭게 얻은 연약지반을 개량하여 사용해야 하는 경우가 늘어나고 있다. 지반의 공학적 성질을 개선하기 위한 지반 개량은 현장의 지반 조건, 시공성 및 경제성 등을 고려하여 적절한 공법을 선택하여 사용해야 하는데, 현재 이용되고 있는 지반개량 공법은 대략 20여 가지가 넘는다.⁽¹⁾ 선행재하 공법은 그 중에서 가장 널리 이용되고 있는 지반개량 공법 중의 하나로, 특히 우리나라의 경우 서해안과 남해안의 대규모 간척 사업에 따른 매립지의 지반개량 공법으로서 여러 가지 배수 공법과 함께 많이 사용되고 있다.

선행재하 공법은 구조물이나 제방의 연약한 기초지반을 개량할 수 있는 효과적이고 경제적인 방법으로, 많은 현장에서 사용되고 있음에도 불구하고 설계 과정이 매우 복잡하여 아직까지 공법 설계절차가 체계화되어 있지 않으며, 관련 기술자들이 공법 설계 및 시공 과정에서 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다. 그러나 이러한 선행재하 공법 설계 절차를 전문가 시스템화 한다면 쉽게 다룰 수 있게 된다.

최근 몇년 사이에 지반 공학적 문제들에 활발히 적용되어 개발되고 있는 전문가 시스템은 컴퓨터 프로그램 자체가 마치 사람처럼 어떤 분야에 대한 정보를 인식하여 질문을 받으면 스스로 추론하여 답을 주는 시스템으로 기존의 컴퓨터 프로그램이 할 수 있었던 역할보다 한 단계 향상된 프로그램이다.⁽²⁾⁽³⁾ 어떤 문제를 해결하기 위한 기존의 프로그램과 전문가 시스템의 차이점을 살펴보면, 기존 프로그램은 구조물의 강도 계산이나 안정 계산 등 명확한 문제를 대상으로 하나 전문가 시스템은 강도 계산이나 안정 계산 등을 포함하여 주위의 상황과

경험적 지식 등을 고려하여 안전하고 경제적인 설계가 이루어지도록 한다. 따라서 경험적이고 불확실성을 많이 내포한 지반공학 분야의 문제 해결을 위한 전문가 시스템 사용은 매우 적절하다고 하겠다.

이 연구에서는 배수공법을 포함하는 선행재하 공법 설계에 관련된 내용들을 체계적으로 정리하고, 정리된 내용을 지식베이스로 구축하여 관련 기술자들에게 실질적인 도움을 줄 수 있는 전문가 시스템을 개발하는데 그 목적을 두고 있다.

2. 선행재하(Preloading) 공법

2.1 선행재하 공법의 정의

연약 지반의 공학적 성질을 개선하기 위한 개량 공법 중의 하나로서, 연약 지반 표면에 계획 구조물의 하중보다 크거나 동등한 하중을 미리 재하하여 목적 구조물 설치 이전에 필요한 만큼의 침하가 발생하도록 유도하는 공법을 선행재하 공법이라고 한다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 가장 오래되기도 가장 널리 사용되고 있는 지반개량 공법 중 하나인 선행재하 공법은 특히 체적감소가 크고 정하중에서 지지력 증가가 큰 흙에 적합하며, 가장 적합한 흙의 종류에는 포화된 연약점토, 압축성이 큰 실트, 유기점토(organic clays), 그리고 이탄토(peat)등이 있다.⁽¹⁾

선행재하 공법은 구조물이나 제방의 연약한 기초 지반을 개량할 수 있는 효과적이면서 경제적인 방법이지만 이 공법은 수개월부터 1년 이상의 긴 시공기간이 필요하므로 토목사업의 계획 초기 단계에서부터 채택여부가 결정되어야 한다. 또한, 이 공법은 재하 하중의 크기와 재하 기간 산정 등 공법 설계과정에서 많은 불확실성과 가정을 내포하고 있으므로 침하량의 크기, 침하속도, 그리고 지반의 활동에 대한 안정성 등을 지속적으로 관찰하고 계획 당시의 예측과 일치하는지 확인하여, 필요하면 설계 내용을 수정할 수 있어야 한다.

선행재하 공법의 경제성은 상재 하중을 재하

하는데 필요한 하중 재료를 쉽게 구할 수 있는
 나에 달려있다. 선행하중을 재하하는 방법으로
 는 토사(또는 암석)의 성토, 물탱크의 설치, 지

하수위의 저하, 앵커(anchor) 또는 잭(jack) 사
 용, 진공매트의 사용 등이 있는데, 이 중에서
 가장 흔히 사용되는 것은 토사의 성토이다.⁽⁵⁾

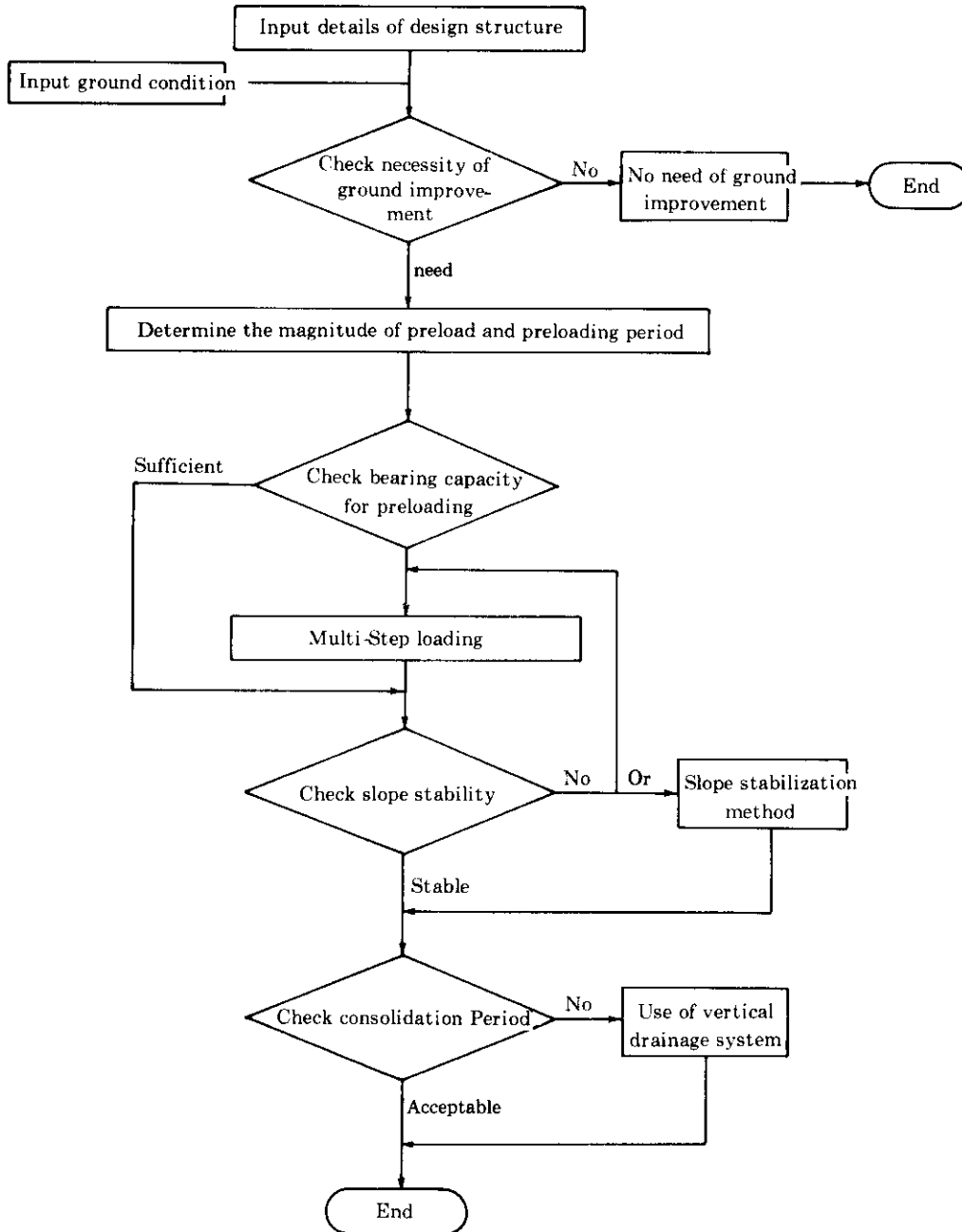


그림 1 선행재하 공법의 설계 절차

어떤 선행하중을 사용하든지 간극수의 유출과 흙의 압축을 일으키는데 선행재하의 목적이 있다. 한편, 선행재하 공법 설계의 핵심은 압밀 침하량과 압밀시간의 계산 및 압밀에 따른 강도 증가 등이며, 그림 1에 선행재하 공법 설계 절차가 나타나 있다.

2.2 선행하중에 의한 압밀 효과

선행재하 공법에 의한 지반개량 효과는 구조물 설치후 기초 지반 침하량을 허용치 이내로 하는 효과와 지반의 전단강도 증대 효과 등 두 가지로 볼 수 있으며, 이 중에서 지반의 침하량 감소효과는 1차 압밀 침하의 감소와 2차 압축 침하의 감소 등 이중적인 요인으로부터 얻어진다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾

지반에 처음부터 설계하중(permanent load, p_d)만을 재하하였을 때, 1차 압밀 침하량과 시간의 관계를 나타내면 그림 2에 점선으로 표시한 곡선과 같이 되며, 이 그림에서 S_d 는 최종 1차 압밀 침하량을 의미한다. 동일 지반에 설계하중보다 p_c (초과하중)만큼 큰 하중을 재하한다면 1차 압밀 침하량과 시간의 관계는 그림 2에 보인 실선과 같이 되며, 침하량의 크기가 설계하중 하에서의 최종 1차 압밀 침하량 S_d 와 같아지는 시간 t_c 가 경과하면 초과하중(sur-

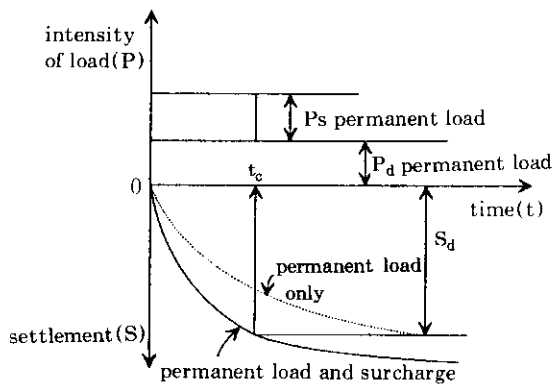


그림 2 선행재하에 의한 1차 압밀침하⁽⁵⁾

charge load)을 제거하여도 더 이상의 1차 압밀 침하가 일어나지 않을 것으로 기대된다.

1차 압밀 침하량과 시간의 관계는 Terzaghi의 1차원 압밀 이론을 이용하여 대략적으로 산출할 수 있다. 설계하중 p_d 를 재하할 때와 설계하중에다 초과하중을 합한 선행하중($p_d + p_s$)를 재하할 때의 정규 압밀 점토의 침하량을 나타내는 식은 각각 다음과 같다.

$$S_d = \frac{C_c}{1+e_0} \cdot H \cdot \log\left(\frac{\sigma_0 + \sigma_d}{\sigma_0}\right) \quad (1)$$

$$S_{d+s} = \frac{C_c}{1+e_0} \cdot H \cdot \log\left(\frac{\sigma_0 + \sigma_d + \sigma_s}{\sigma_0}\right) \quad (2)$$

여기서, H는 압밀층의 두께를 나타내고 e_0 는 초기간극비, C_c 는 압축지수, σ_0 는 압밀층이 받고 있던 지반의 자중에 의한 유효 연직 하중, σ_d 는 설계하중(p_d)에 의해서 발생하는 수직응력의 증가량을 나타낸다.

선행하중 하에서 지반의 압밀 침하량이 S_d 에 이르는 시간 t_c 경과 직후의 평균 압밀도를 U_c 라고 하면 아래와 같은 식이 성립된다.

$$S_d = u_c \cdot S_{d+s} \quad (3)$$

이 식에 식(1), (2)를 대입하고 U_c 에 대해서 정리하면,

$$U_c = \frac{\log\left(1 + \frac{\sigma_d}{\sigma_0}\right)}{\log\left[1 + \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_0}\right)\left(1 + \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_0}\right)\right)\right]} \quad (4)$$

가 된다. 즉, 개량하고자 하는 지반에 선행재하를 하고 평균 압밀도가 U_c 에 이르는 시간 t_c 경과 후 초과하중을 제거하면, 설계하중 하에서 더 이상의 침하가 발생하지 않는다. 이때 시간(t)과 평균 압밀도(U)는 시간 계수 T_v 에 의해서 연결된다. 시간 계수(T_v)는 다음 식에 의해서 계산할 수 있다.

$$T_v = \frac{c_v \cdot t}{H^2} \quad (5)$$

여기서, H는 배수 거리이며 c_v 는 압밀 계수이다.

위의 식(4)와 (5)에서 보면 초과하중(σ_c , 식(4))과 재하 시간(t 식(5))이 미지수이고, 둘 중 하나가 먼저 결정되면 다른 하나는 자동적으로 관계식에 의해 결정된다. 따라서 초과하중과 재하 시간의 조합은 현장 여건에 의해 좌우되는데, 예를 들면 하중 재료의 부족으로 초과하중의 크기가 제한되면 그에 따른 재하 시간 동안 압밀이 완료되도록 기다려야 하고, 시간 상의 제약이 있으면, 그 재하 시간 내에 필요한 평균 압밀도를 얻을 수 있는 초과하중을 산출하여 재하해야 한다.

2.3 비배수 전단강도의 증가

선행재하에 의한 압밀 과정에서 지반의 비배수 전단강도가 증가한다. 압밀에 의한 강도 증가를 예측하기 위하여, 흙의 소성지수, 유효 연직 응력에 대한 비배수 전단강도비 (c_u/p_o)의 관계 그리고 압밀 비배수 삼축 압축 시험 결과로부터 구한 비배수 강도 곡선 등을 이용한다.

선행재하 공법의 경우에는 초과하중에 의한 압밀이 완료되기 전에 하중의 일부를 제거하므로 초과하중 전부를 압밀 응력으로 볼 수 없으며, 특히 지반 내의 깊이에 따라 강도 증가의 크기가 변화한다. 따라서, 비배수 전단강도 증가 효과를 설계 및 시공에 반영하고자 할 때에는 선행하중을 재하한 직후에 현장 시험을 통하여 비배수 전단강도를 직접 평가함이 바람직하다. 증가된 전단 강도는 식(6)에 의해 계산할 수 있다.⁽⁷⁾

$$c_u = (c_u)_o + \Delta p \cdot U (\Delta c_u / \Delta p) \quad (6)$$

여기서, $\Delta c_u / \Delta p$ 는 강도 증가율로 증가 점착력과 증가 응력과의 비를 의미하며, $(c_u)_o$ 는 초기 점착력을 나타낸다. 일반적으로 점성토의 강도 증가율은 0.2~0.4정도이며, 강도 증가율 $\Delta c_u / \Delta p$ 를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\textcircled{1} \frac{\Delta c_u}{\Delta p} = \frac{\sin \phi_{cu}}{1 - \sin \phi_{cu}} \quad (7)$$

여기서, ϕ_{cu} 는 압밀 비배수 삼축 압축 시험 결과

얻어지는 마찰각이다.

$$\textcircled{2} \frac{\Delta c_u}{\Delta p} = 0.11 + 0.0037 I_p \quad (\text{for } I_p > 10) \quad (8)$$

여기서, I_p 는 소성지수이다.⁽⁸⁾

$$\textcircled{3} \frac{\Delta c_u}{\Delta p} = 0.45 LL \quad (\text{for } LL > 0.4) \quad (9)$$

여기서 LL은 액성한계를 100으로 나눈 값이다.⁽⁹⁾

$$\textcircled{4} \frac{\Delta c_u}{\Delta p} = \frac{\sin [K_o + A_r (1 - K_o)]}{1 + (2A_r - 1) \cdot \sin \phi} \quad (10)$$

여기서, K_o 는 정지 토압 계수, A_r 는 간극 수압 계수 그리고 ϕ 는 삼축 압축 시험 결과 얻어지는 마찰각이다.⁽¹⁰⁾

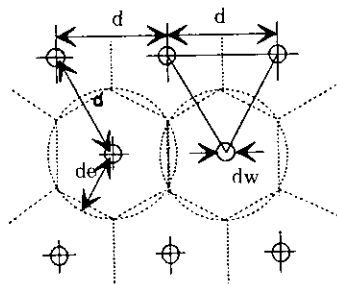
2.4 압밀 촉진 공법(배수공법)

선행재하 공법에 의한 지반 개량시, 투수성이 나쁜 연약 점토 층의 두께가 두꺼우면 지반 개량에 소요되는 시간이 1년이상, 경우에 따라서는 수년씩 길어지게 되는데, 이 시간을 단축시키기 위해서는 샌드 드레인 공법 등 여러가지 배수 촉진공법을 사용하여 압밀을 촉진시켜야 한다. 배수공법은 이탄토(peat), 유기점토(organic clays) 등 침하 거동이 2차 압축에 의해 지배되는 지반에서는 효과가 적다. 연직배수 공법은 배수재로 모래나 종이, 플라스틱 등을 사용하는데, 사용 재료와 시공법에 따라 크게 샌드 드레인 공법과 페이퍼 드레인 공법으로 분류된다.

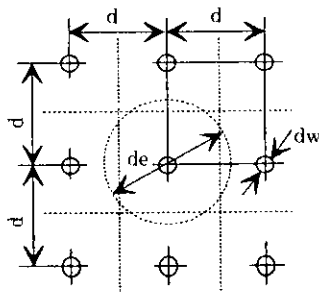
2.4.1 샌드 드레인(Sand Drain)공법

샌드 드레인 공법은 가장 대표적인 연직배수 공법으로 1936년 미국의 O.J. Porter에 의해 개발되었으며, 일반적으로 1952년부터 널리 이용되어 왔다. 샌드 드레인 공법은 직경 20cm~50cm의 모래 말뚝을 1.5m~6.0m 간격으로 설치한 다음, 지표면에 상재 하중을 재하시켜 압밀을 촉진시키는 공법으로 설치 방법으로는 대표적으로 드리븐맨드렐(driven mandrel)방법과 오픈맨드렐(open mandrel)방법이 흔히 쓰인다.

샌드 드레인 공법 설계에서 가장 중요한 요소는 드레인의 설치 간격이다. 드레인의 설치 형태는 그림 3과 같이 정방형이나 3각형으로 배치한다. 드레인 간격의 합리적인 결정을 위해서는 수평 및 연직 방향의 압밀 계수(c_v , c_h)를 정확히 아는 것이 중요하다. 일반적으로 c_h/c_v 비가 클수록 드레인 설치 효과가 크다. 연직 배수구의 집수 범위는 그림 3처럼 각 드레인에 대해 등거리에 있는 면으로 짜인 정 6각형 또는 정방형이며, 이 집수 범위 안에 있는 간극수는 그 중심에 있는 연직 배수구로 배수된다. 그러나 압밀을 계산할 때는 다각형 경계 조건으로 해석하면 계산이 복잡하므로 Barron(1948)⁽¹¹⁾은 이것을 동일면적의 원으로 바꿔서 계산하였다. 이 방법은 현재의 모든 배수공법의 압밀계산의 기본이 되고 있다.



(a) equilateral triangle



(b) square

그림 3 샌드 드레인의 배치 형태와 유효원

Barron(1948)은 등변형률(equal strain)의 경우에 대한 압밀 방정식의 약식해로 수평방향에 대한 평균 압밀도를 다음과 같이 제안하였다.

$$U_h = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F(n)}\right) \quad (11)$$

여기서,

$$T_h = \frac{c_h \cdot t}{d_e^2} \quad (12)$$

$$F(n) = \left(\frac{n^2}{n^2-1}\right) \cdot \ln(n) - \left(\frac{3n^2-1}{4n^2}\right) \quad (13)$$

$$n = \frac{d_v}{d_w} \quad (14)$$

식(12)에서 t 는 압밀시간, T_h 는 시간계수이다. 유효 집수 지름 d_e 는 모래 말뚝의 간격을 d 라고 하면 다음 식에 의해 계산할 수 있다.

$$\text{정삼각형 배치 } d_e = 1.050 \cdot d \quad (15)$$

$$\text{정방형 배치 } d_e = 1.128 \cdot d \quad (16)$$

식(11)에서 압밀도 U_h 는 시간계수 T_h 와 간격비(spacing ratio) n 의 함수이며, 간격비는 식(14)과 같이 d_e 와 d_w 에 의해서 결정된다. 식(12)의 압밀 시간 계산식은 간극수가 수평 방향으로 배수된 경우인데, 실제로는 수평 방향뿐만 아니라 연직 방향으로도 배수되므로 평균 압밀도는 다음 식에 의해서 계산될 수 있다.⁽¹²⁾

$$U = 1 - (1 - U_h)(1 - U_v) \quad (17)$$

여기서, U_h 는 수평방향, U_v 는 연직방향의 압밀도를 의미한다. 그러나 모래 말뚝의 간격에 비해 일반적으로 연직 배수 공법을 사용하는 지반은 점성토층이 두꺼우므로, 연직 방향의 압밀 배수는 통상 미소하며 무시되는 경우가 많다.

2.4.2 페이퍼 드레인(Paper Drain) 공법

그림 4처럼 카드보드라는 통수구가 있는 두꺼운 종이를 배수재로 사용하는 페이퍼 드레인 공법은 1948년에 스웨덴의 Kjellman(1948)⁽¹³⁾에 의해 연구 개발된 공법으로 1963년부터 사용되기 시작하였다. 최근에는 연직 모래 말뚝에 사용되는 모래를 충분히 확보하기가 어렵고

가격도 비싸기 때문에, 미리 제작된 두께 1~7 mm, 폭 100mm의 띠모양의 카드보드를 사용하는 페이퍼 드레인 공법이 자주 사용되고 있다. 미리 제작된 띠모양의 배수구는 변위에 강하기 때문에 모래 말뚝에서 쉽게 일어나는 전단 변위로 인한 효율 상실은 발생하지 않는 장점이 있다.

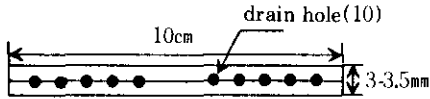


그림 4 카드보드의 단면과 치수

카드보드의 설치 간격 산정은 연직 모래 말뚝과 같은 방법을 사용하는데 폭 b , 두께 t 인 카드보드의 등가직경(d_w)은 다음과 같이 산출한다.

$$d_w = \frac{(b+t)}{2} \quad (18)$$

현재 일반적으로 쓰고 있는 드레인 페이퍼(drain paper)는 $b=10\text{cm}$, $t=0.3\text{cm}$ 이므로 식(18)을 사용할 경우, $d_w=(10+0.3)/2=5.15\approx 5\text{cm}$ 가 되어 직경 5cm의 샌드 드레인으로 볼 수 있다. 이와같이 드레인 페이퍼의 환산경이 정해지면 샌드 드레인일 때 사용한 Barron의 방식에 의하여 식(11)을 이용하여 쉽게 설계할 수 있다.

2.4.3 교란효과(Smear Effect)의 고려

모래 말뚝을 지반 내에 설치하는 과정에서 말뚝 주위 지반의 교란을 초래하게 되는데, 이 교란으로 인하여 지반의 수평방향 투수성이 크게 저하되고, 따라서 압밀도의 산정에도 영향을 미치게 된다. 그러나 드레인 공법 설계에 있어서 대부분 이러한 교란효과를 고려하지 않고 이상적인 모래 말뚝으로 가정하여 설계가 이루어지고 있다. 이상적인 모래 말뚝으로 가정하여 잔류 과잉 간극수압의 크기 및 압밀침하량 등을 예측하는 경우 현장에서의 실측치와 상당

한 차이를 보이는 경우가 많은데, 이에 대한 주요 원인은 모래 말뚝을 설치하는 과정에서 예상되는 교란된 주변지반(smear zone)의 존재 외에 모래 말뚝 내부에서의 물의 흐름에 대한 저항(well resistance)에 의한 수두손실, 그리고 모래 말뚝 내부에서의 응력 집중 및 시간에 따른 공사 하중의 크기변화를 적절하게 반영하지 못한 점 등이 있다.

Hansbo(1979)⁽¹⁴⁾는 Barron(1948)의 방정식을 수정하여 미리 제작된 드레인에 적용한 식을 제안하였다. 교란효과와 물의 흐름에 대한 저항을 고려한 수정된 평균 압밀도의 기본 형태는 다음과 같다.

$$U_h = 1 - \exp\left(-\frac{8T_h}{F}\right) \quad (19)$$

여기서, $F=F(n)+F_s+F_r$ (20)

식(19)에서 F 는 기둥의 설치 간격($F(n)$)과 교란효과(F_s) 그리고 물의 흐름에 대한 저항(F_r)에 따른 전체적인 영향을 나타내는 인자(factor)이다. 기둥의 설치 간격에 의한 영향 $F(n)$ 은 앞의 식(13)에 의해서 구할 수 있으며, 간격비(n)가 20이상인 일반적인 드레인의 경우에는 다음과 같이 단순화될 수 있다.

$$F(n) = \ln n - \frac{3}{4} \quad (21)$$

한편, 교란효과에 의한 영향 인자(smear effect factor) F_s 는 다음과 같다.

$$F_s = \left(\frac{k_h}{k_s} - 1\right) \log \frac{d_s}{d_w} \quad (22)$$

여기서, d_s 는 기둥 주변의 교란지역의 직경, k_h 는 비교란 지역의 횡방향 투수계수이며, k_s 는 교란지역의 횡방향 투수계수이다.

물의 흐름에 대한 저항을 고려하는 개념의 도입은 압밀도에 영향을 미친다. 미리 제작된 드레인의 경우 배수 능력이 제한되기 때문에 Hansbo(1979)는 기둥의 연직 방향으로 Darcy의 법칙이 적용될 수 있다는 가정 하에 드레인 저항에 의한 영향 인자(drain resistance factor)인 F_r 를 다음과 같이 제안하였다.

$$F_r = Z(L - Z) \left(\frac{k_h}{q_w} \right) \quad (23)$$

여기서, z 는 기둥의 배수구 끝으로 부터의 거리이고, L 은 단면 배수의 경우 기둥의 길이이며, 양면 배수의 경우 기둥 길이의 반이 된다. q_w 는 수두 경사가 1일 때의 배수 능력이다.

Hansbo(1979), Bergado et al.(1991)⁽¹⁵⁾등은 실험을 통하여 교란효과의 영향을 이미 확인한 바 있으며, 교란효과를 설계에 반영하는 가장 간단한 방법은 Leonard(1962)⁽¹⁰⁾등이 제안한 것과 같이 모래 말뚝의 직경을 1/2에서 1/5까지 줄여서 유효직경을 가정하는 방법이다. 한편, 실제 실험에 의하면 c_h 값이 c_v 값에 비해서 2-10배까지 큰 결과를 보여주는데, 모래 말뚝의 설계에 있어서 $c_h = c_v$ 를 가정하는 경우 충분히 교란효과를 고려한 것과 같은 결과를 주기 때문에 실설계에 많이 사용되고 있는 실정이다.

2.5 현장 계측 관리

선행하중과 연직배수에 의해서 지반을 개량하는 문제에 있어서 공사의 최종 단계에 이르기까지 재하 구조물의 안정이나 침하와 관련된 지반의 거동을 미리 예측하는 것은 매우 어렵다. 실제로 현장에서 침하판과 같은 계측기기를 사용하여 시간의 경과에 따른 압밀침하량을 측정해 보면 이론적인 계산 결과와 꼭 일치되는 경우가 드물다. 이것은 지반의 불균일성 및 이방성, 토질시험시 토질정수의 결정상의 문제, 샌드시임(sand seam)의 존재, 횡방향 변위에 의한 침하 등 설계시에 반영하기 어려운 변수가 많이 존재하기 때문이다. 이와같이 지반이 지닌 불확실성 때문에 장기적인 예측은 많은 문제를 일으킬 수 있으며, 이를 극복하고 합리적인 시공과 안전 관리를 하기 위해서는 현장의 계측 관리가 반드시 필요하다. 현장에서 계측은 관리항목을 명백히 하고 적절한 계측기를 배치하여 지반의 거동을 시간에 따라 관측하고, 이에 따라 얻어진 자료들을 적절한 시기에 해석 평가함으로써 시공에 반영되도록

해야 한다.

성토에 따른 계측 관리는 (1) 침하관리, (2) 안정 관리, (3) 주변 지반에의 영향 방지 등 크게 3가지로 나누어 실시되는데, 흙의 거동과 직접 관련되어 있는 요소는 (1), (2)의 사항이다.⁽¹⁶⁾

3. 전문가 시스템

3.1 전문가 시스템의 정의

전문가 시스템이란 어떤 특정 분야에 대한 인간 전문가들의 전문지식들을 수집, 정리하여 그 분야에 대한 전문성이 없는 일반인이나 또는 의사 결정의 고도화를 달성하고자 하는 사람들을 위해 개발된 대화식 컴퓨터 프로그램이다.

실용화에 성공한 인공지능의 한 분야인 전문가 시스템을 좀더 자세히 설명하면 다음과 같다. 전문가 시스템은 특정 분야의 전문가들의 전문 지식들을 프레임, 규칙, 의미 네트워크 등의 지식 표현 기법을 이용하여 화일 형태의 지식베이스(knowledge base)를 구축한 후, 지식베이스를 컴퓨터의 메인 메모리(main memory)에 적재하여 전문가 시스템 사용자(user)의 질문을 입력 받을때, 추론엔진(inference engine)에 의한 일련의 추론과정을 통하여 얻어낸 추론 결과를 출력함으로써, 전문가의 지식과 조언에 해당하는 기능을 제공해 주는 시스템이다.⁽²⁾⁽³⁾

전문가 시스템의 능력은 근본적으로는 입력된 지식의 질 및 양에서 비롯되며, 전문가의 전문지식의 분야 및 특성에 따라 적합한 지식 표현 기법을 선택했는가, 지식 표현 기법에 알맞은 추론 기법을 선택했는가, 그리고 전문가 시스템이 얼마나 사용하기에 편리하게 되어있느냐 등에 달려있다.

3.2 전문가 시스템의 특징

전문가 시스템을 정의하는 다른 방법은 이를

보통의 프로그램과 비교하는 것이다. 가장 기본적인 차이는, 보통의 프로그램이 데이터(data)를 처리하는데 반하여 전문가 시스템은 지식(knowledge)을 처리한다는 것이다. 표1에 전문가 시스템과 일반 프로그램과의 차이가 비교, 요약되어 있다. 한편, 인공지능(artificial intelligence)의 한분야인 전문가 시스템은 인간 전문가와 비교할 때 많은 장점과 단점을 동시에 가지고 있으며, 요약하면 표2와 같다.

표 1 일반 프로그램과 전문가 시스템의 차이⁽¹⁷⁾

일반 프로그램	전문가 시스템
데이터를 표현하고 처리	지식을 표현하고 처리
알고리즘을 사용	휴리스틱을 사용
반복적인 처리	추론적인 처리
대규모의 데이터 베이스	대규모의 지식 베이스를
효과적으로 처리	효과적으로 처리

표 2 전문가 시스템과 인간 전문가의 비교⁽¹⁷⁾

전문가 시스템	인간 전문가
영구적	소멸가능
전달이 쉬움	전달이 어려움
지식의 추가, 수정이 용이	지식의 추가, 수정이 어려움
의견의 일관성	의견의 일관성 부족
비용이 저렴	비용이 고가
창조성이 없음	창조적
지침을 받아야 함	적용적
심볼에 의한 입력	감각에 의한 경험
작은 범위에 적용	광범위하게 적용
기술적 지식	상식적 지식

3.3 전문가 시스템의 구성

전문가 시스템은 그림 5에 보인 것처럼 지식베이스(knowledge base), 추론기관(inference engine), 지식 획득 기능(knowledge acquisition facility), 설명기능(explanation facility), 사용자 인터페이스(user interface), 후관계(context) 등으로 이루어져 있다.⁽³⁾ 이

중에서 전문가 시스템의 핵을 이루고 있는 부분은 전문가의 전문지식이 화일(file)형태로 저장되어 있는 지식베이스와 입력내용을 지식베이스와 비교하여 결과를 이끌어내는 추론기관이다. 전문가 시스템은 사용자 인터페이스로 입력된 사용자의 명령에 대해서, 전문 지식을 이용한 추론과정을 통해 답을 출력하게 된다.

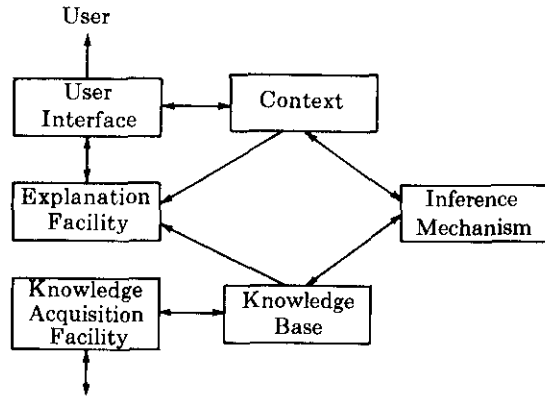


그림 5 전문가 시스템의 구성⁽¹⁷⁾

3.4 전문가 시스템 개발을 위한 도구(tool)

전문가 시스템 개발 도구는 전문가 시스템을 개발하는 업무를 보다 쉽게 하기 위하여 만들어진 프로그래밍 시스템이다. 이들의 범위는 아주 고급(high-level)의 프로그래밍 언어(programming language)로부터 저급(low-level)의 지원부분(support facilities)까지 다양하다. 그림 6은 전문가 시스템의 개발에 사용되는 도구들을 구분하고 있다.

3.5 지반 공학 분야의 적용 사례

전문가 시스템은 CAE(computer aided engineering)의 새로운 분야로서 최근에 지반공학 분야에 적용되어 개발 연구되고 있다. 전문가 시스템은 지반공학 분야와 같이 특정 문제를 해결하는데 있어서 전문가의 판단이 포함되

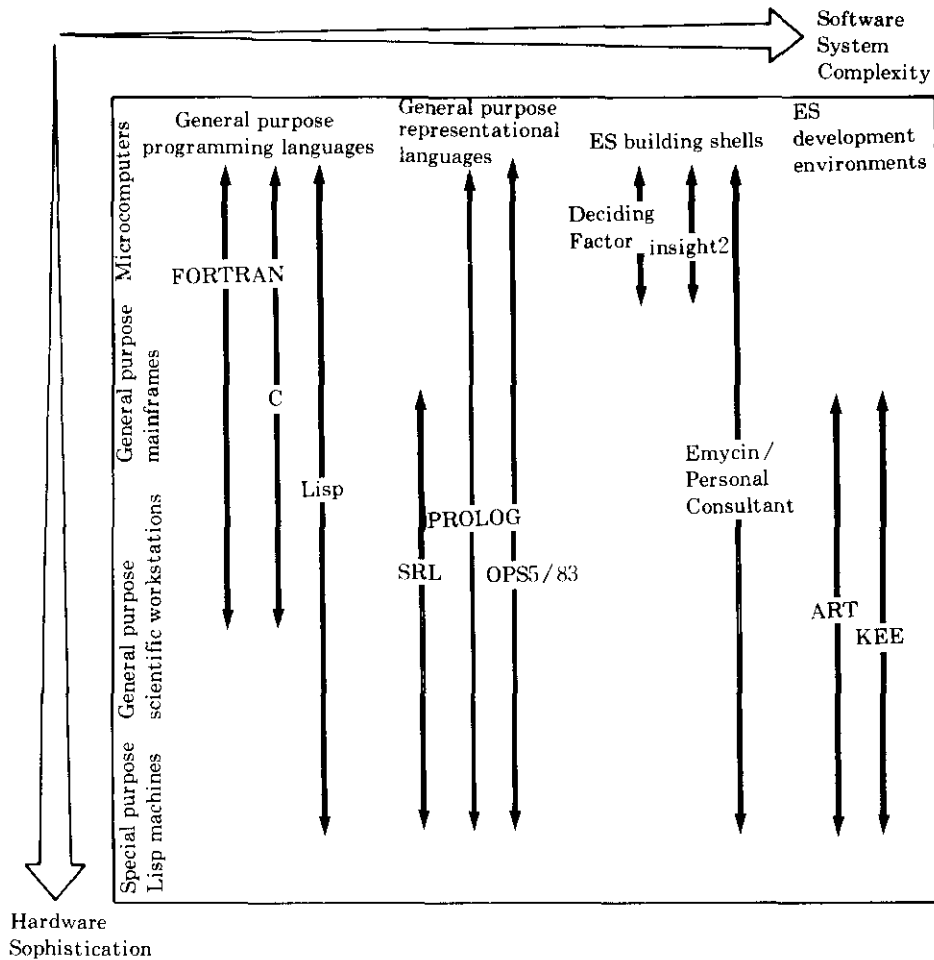


그림 6 전문가 시스템 개발에 사용되는 도구의 종류⁽³⁾

는 경우에 유용하다. 과거에 지반공학 분야에서 컴퓨터 이용은 명확하게 정의된 수치해석 (numerical analysis)이나 설계도면의 작성 그리고 컴퓨터 통신망을 통한 데이터 베이스의 이용 등에 제한되었다. 최근에 인공지능 분야의 발달과 함께 지식베이스 전문가 시스템이라고 불리는 새로운 분야가 CAE에 포함되었다. 제한된 문제 해결에 있어서 인간 전문가를 흉내낸 이 시스템은 불확실성(uncertainty)을 다루게 됨에 따라 기존 프로그램이 가지고 있는 제약에서 벗어나게 되었다. 즉, 전문가 시스템은 의사 결정, 진단 등 복잡한 문제에 대하여

유추적 방법을 사용하며 확실하지 않은 조건, 형상, 사건에 대하여 인간에게 판단을 제공해 준다. 따라서 경험적이고 불확실성을 많이 내포한 지반 공학 분야의 문제 해결을 위하여 전문가 시스템의 적용은 매우 적절하며, 앞으로도 계속해서 폭넓게 적용할 수 있는 잠재력을 가지고 있다.⁽¹⁸⁾

현재 개발 중이거나 실용중인 지반공학 관련 전문가 시스템을 정리하여 보면 표3과 같다. 표에서 보는 바와 같이 지반 조사, 기초설계, 지하 굴착, 사면 안정, 옹벽 등 다양하게 적용되고 있다. 일본토목학회 통계에 의하면 1990

표 3 지반공학 관련 전문가 시스템 (3)(18)(19)(20)

구분	시스템 명	주요 내용	개발환경	개발자(기관)
지반조사	· CONE	흙의 분류 및 전단 강도 판단	OPS5	Mullarkey, P. W
	· SOILCON	지반조사량 및 수준 판단	M.I	University of Texas at austin
	· LOGS	지층구조 파악	OPS5, LISP	Lok, M
기초설계	· CUFAD	기초설계 및 해석	Microsoft Windows	Cornell University
	· FOOTER	구조물 기초설계	LISP	Fenves. S. 등
지하굴착	· Shallow Trenchs	트렌치 설계	Personal Consultant	Konkoly, G.M
	· Expert System for Tunnel Construction	터널굴착시 장비 및 공정계획	KBMS	일본大成건설
사면안정	· Selection of	Stabilizing Slope Method	사면안정 공법 선정	일본大成건설
	· Slope Cut Design Support Expert System	사면절개시 안정각 결정	OPS83	일본大成건설
옹벽	· RETWELL · RETAIN	옹벽설계 옹벽파괴전단 및 방지 방법 제안	BUILD LISP	Hutchinson. P.J Adams. T.M. 등

년 현재 일본에서 전문가 시스템 개발에 참여하고 있는 회사는 무려 200여개에 이르며, 연구되고 있는 전문가 시스템은 400여개가 넘는다고 한다.⁽¹⁹⁾

4. 전문가 시스템의 개발

4.1 개발에 사용된 도구(CLIPS)

이 연구에서는 국내외에서 사용되고 있는 개발 도구 중에서 이 연구에 적합하다고 판단되는 CLIPS를 이용하여 전문가 시스템을 구축하였다. CLIPS(C language integrated production system)는 전문가 시스템의 구축을 위해서 1984년 NASA의 Johnson Space Center에서 처음 개발되었으며, 그림 6의 OPS5를 C로 재구현한 개발 도구로서 1991년

10월에 버전(version) 5.1이 소개되었다. CLIPS의 기본적 추론 방법은 Rete 알고리즘(algorithm)에 근거한 전진 추론(forward chaining)방법을 사용한다. CLIPS는 현재 미국 내에서 약 3300명 이상이 170여개 학교, NASA의 각분야, 군, 정부기관 등지에서 사용하고 있다.⁽²¹⁾

CLIPS는 추론 기구를 C언어로 구현하였고, CLIPS의 기능을 사용자가 추가로 수정할 수 있도록 C언어의 소스(source) 화일을 제공하고 있다. 따라서 CLIPS는 C와 자유롭게 인터페이스되며, 기타 언어(FORTRAN, PASCAL 등)와도 손쉽게 인터페이스될 수 있다. 또한 CLIPS는 거의 모든 수학적인 함수가 지원되기 때문에 수치 계산에 유리하며, 그래픽을 자유롭게 구현할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 반면, CLIPS는 제공하는 기능들이 정형화되어 있지 않고, 추론 기법 및 사용자 인터페이스 자

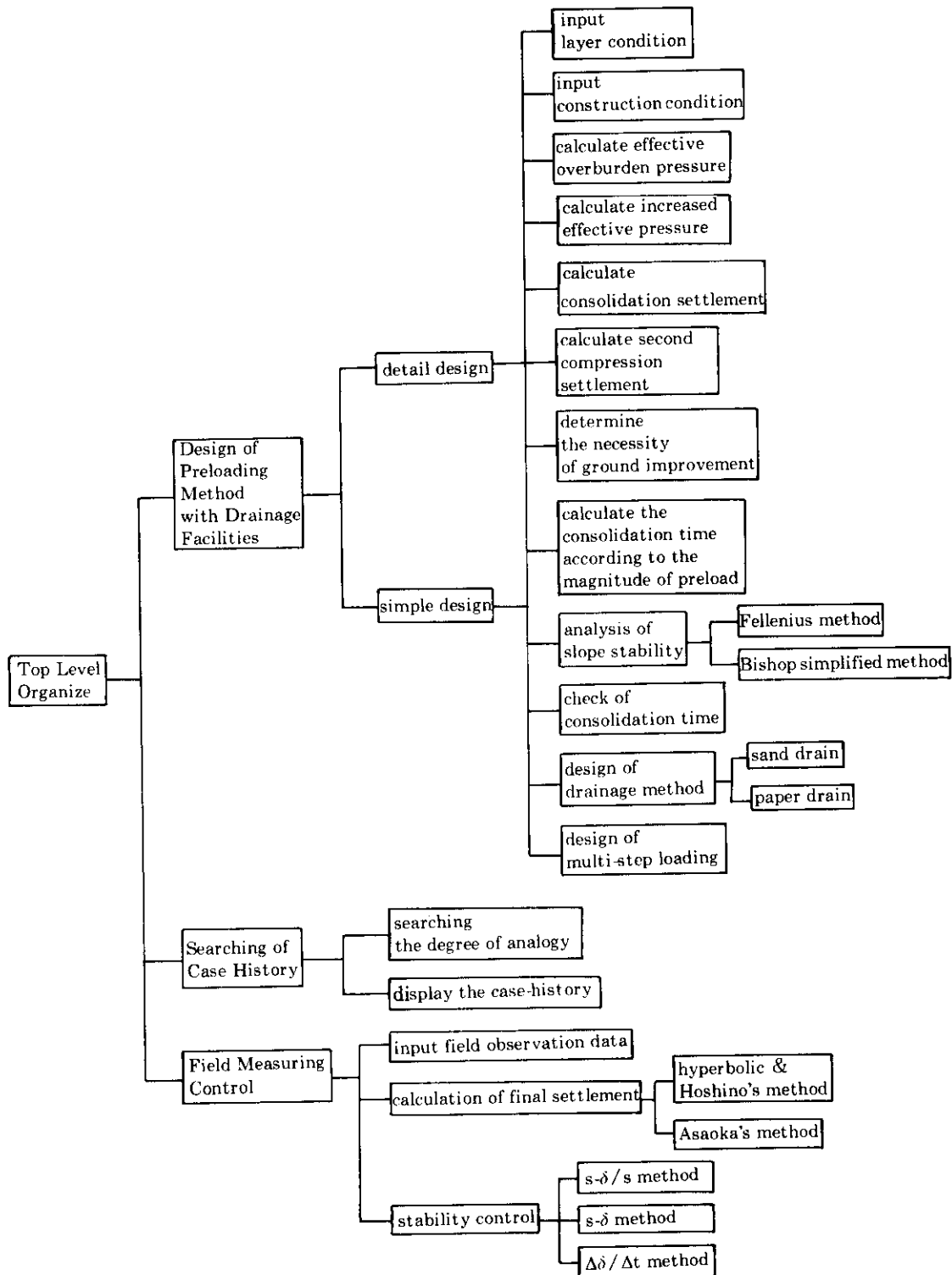


그림 7 ESOP의 구조

체를 프로그래머에게 제공하여 주지 않기 때문에, 다른 전문가 시스템 구현 도구(tool)에 비해 프로그램하는 과정 및 편의성면에서 다소 불편하고 어려운 면이 있다.

4.2 개발환경

이 연구에서 전문가 시스템은 워크스테이션(workstation) 환경 하에서 개발되었다. 구축할 전문가 시스템은 상당히 큰 프로그램이 될 것으로 예상되므로, PC환경에서 발생할 수 있는 메모리 용량 문제를 해결하기 위해서 UNIX로 운영되는 워크스테이션(workstation) 환경 하에서 전문가 시스템을 개발하였다. 개발에 사용된 워크스테이션은 (주)삼보에서 제작한 TriGem station SDT-300 워크스테이션이고, 사용자의 사용 편의를 위해 만들어진 사용자 정의 함수들은 X 윈도우(window) 시스템에서 제공해 주는 라이브러리인 XLIB를 사용하여 만들어졌다.

X 윈도우 시스템은 미국 MIT 공대에서 개발되었고, 1987년 버전 11이 발표된 이래, 워크스테이션의 GUI(graphical user interface)를 위한 기초 수단으로서의 확고한 지위를 누리고 있다.⁽²²⁾

4.3 개발된 전문가 시스템의 구성

개발된 전문가 시스템인 ESOP(expert system of preloading method)은 크게 배수 공법을 포함하는 선행재하 공법 설계, 과거 시공사례 탐색 그리고 현장 계측 관리 등 세부분으로 이루어져 있으며, 구체적인 구조는 그림 7과 같다. ESOP은 총 45개의 규칙 집합과 1개의 사실 집합, 총 52개의 사용자 정의 함수(userdefined function) 그리고 과거의 시공사례들이 숫자들의 집합으로 표기되어 있는 1개의 퍼지셋(fuzzy set)으로 이루어져 있다. 총 45개의 규칙들은 수백개의 if-then으로 구성되어 있으며, 프로그램이 처음부터 끝까지 빠짐 없이 실행되는 경우 총 21개의 데이터 화일(data file)이 만들어진다. 한편, 사용자 정의 함수는 대부분, 사용자의 자료 입력과 추론 및 계산 결과의 출력을 위한 그래픽 화일(graphic file)들이며, 사용자의 편의를 위해서 만들어졌다. ESOP에서 사용되고 있는 사용자 정의 함수와 프로그램 실행으로 만들어지는 데이터 화일은 각각 표 4, 5와 같다. 데이터 화일에는 1개의 퍼지셋(fuzzy set)이 포함되어 있다.

표 4 ESOP에서 사용되고 있는 사용자 정의 함수

logo	main-manu	design-method	layer-input
struct-input	second-sett-input1	second-sett-input2	second-sett-input3
bearing-input	embank-input	slope-input	drain-input
multi-input	multi-input2	case-input	control-input
sim-layer-input	sim-struct-input	sim-embank-input	sim-drain-input
keyinput	cal-delta-p	popdsd	guess-cc
check	cal-preload	cal-drain	table-1
table-23	table-56	table-7	fig-layer
fig-drain	det-design	multi-step	chk-slope
field-1	field-2	field-3	predict-1
predict-2	caseh-1	caseh-2	caseh-3
caseh-4	caseh-5	fig-ht	fig-vhv
fig-hv	search	case-history	fir-preload

표 5 ESOP의 실행으로 생성되는 데이터 파일 및 퍼지셀

ciw.dat	layer.dat	sdv.dat	pct.dat
sett.dat	popdsd.dat	check.dat	pfil.dat
preload.dat	ufil.dat	drain.dat	sell.dat
select.dat	multi.dat	cgg.dat	inp.dat
field.dat	pops.dat	predict.dat	case.dat
step.dat	zem.dat		

4.4 개발된 전문가 시스템의 특징

개발된 전문가 시스템의 특징을 요약 정리하면 다음과 같다.

(1) 선행재하 공법 설계

- ① 도로 등의 성토 제방, 저장 탱크, 저층 구조물(뚝대 및 벽돌구조) 등 3가지 구조물에 대해 선행재하 공법을 설계할 수 있다.
- ② 최대 4개층의 지반 조건을 가진 경우에 대해서 설계할 수 있다.
- ③ 선행하중으로는 성토하중만을 사용한다.
- ④ 각 선행하중(예: 설계하중의 1.1배에서 2.5배)이 작용했을 때, 설계하중 작용하의 침하량에 도달하는 압밀 시간을 계산하고 각 선행하중에 대한 압밀 시간의 관계 곡선을 그린다.
- ⑤ 선택한 성토고에 대하여 Fellenius 방법 및 Bishop의 간편법으로 사면안정 해석을 할 수 있다.
- ⑥ 기초 지반이 연약하여 선택된 성토하중을 지지할 수 없을 경우에는 지지력의 증가를 검토하여 다단계 재하를 하도록 제안한다.
- ⑦ 침하량 계산에서 2차압축 침하를 포함시킬 수도 있다.
- ⑧ 모래층이 중간에 끼어있는 경우에도 설계할 수 있다.

(2) 배수공법 설계

- ① Barron이 제안한 방법에 의해서 샌드 드레인과 페이퍼 드레인 공법을 설계할 수 있다.
- ② 각 선행하중의 크기와 각 드레인 간격(예:

1.4~2.8m)에 대한 설계하중 작용하의 침하량에 도달하는 압밀 시간을 계산하고, 또한 이러한 관계 곡선을 그래프로 나타낸다.

③ 다음의 세가지 방법으로 교란 효과를 고려하여 배수 공법을 설계할 수 있다.

- (a) Hansbo(1979)가 제안한 방법
- (b) Leonard(1962)등이 제안한 방법
- (c) $c_v=c_v$ 로 가정하는 방법

(3) 설계 과정의 이원화

① 설계 과정을 (a)상세 설계와 (b)단순 설계로 이원화시켜서, 단순하게 설계의 핵심이 되는 부분만을 얻고자 하는 경우에는 간단한 자료 입력만을 더욱 빠른 시간에 필요한 자료를 얻도록 하였다.

② 단순 설계에서는 사용자가 입력해야 할 사항을 최소한으로 줄였고, 계산에 필요한 나머지 값들은 내부 처리에 의해 추정된 값을 사용하거나 또는 내정된 값을 사용하였으며, 사용자가 원하는 경우에는 입력할 수도 있게 만들었다. 표 6에 상세 설계와 단순 설계에 있어서 필요한 입력 data가 정리되어 있다.

(4) 시공사례 탐색

ESOP은 과거의 시공사례를 정리하여 사용자가 원하는 경우 시공사례를 보여줄 수 있게 되어 있다. 여기에서는 시공사례와 현장조건을 0에서 1.0사이의 숫자로 나타낸 퍼지 셀(fuzzy set)⁽²³⁾으로 변환시켜서, 과거의 시공사례와 설계하려는 현장을 6가지 항목(설계구조물의 종류, 개량 면적, 개량 깊이, 지하수위, 시공 지역, 공사 기간 등)에 대하여 비교하여 어느 정도 유사성을 갖는지를 탐색하도록 만들었다.

(5) 현장 계측 관리

ESOP은 성토 후 계측을 통해서 얻어지는 현장의 실측자료를 근거로 하여 침하 및 안정 관리를 할 수 있다. 침하 관리에서는 (1) 쌍곡선 방법, (2) 평방근법, (3) Asaoka방법 등에 의해서 최종 침하량을 예측할 수 있으며, 안정

표 6 사용자가 입력해야 할 사항

(a) 상세 설계

지반조건	지층수, 지표면 위치(+/-m), 지하수위(+/-m), 각 지층의 두께(m), 각 지층의 단위중량(t/m^3), 바닥면의 배수조건, 각 지층의 초기 간극비, 압축지수, 압밀계수(cm^2/sec), 2차 압축계수, 각 지층의 점착력(t/m^2), 마찰각($^\circ$), 액성한계(%), 소성한계(%)
설계조건	설계구조물의 종류(1. 도로 2. 저장탱크 3. 저층구조물) 1의 경우 : 도로폭(m), 길이(m), 높이(m), 사면경사각(1:x), 단위중량(t/m^3), 점착력(t/m^2) 2, 3의 경우 : 설계하중(t/m^2), 기초의 근입깊이(m), 기초의 길이(m), 폭(m), 기초의 형상
선행하중	성토하중의 사면 경사각(1:x), 마찰각($^\circ$) 점착력(t/m^2), 단위중량(t/m^3)
배수공법	배수공법의 종류(1. 샌드드레인 2. 케이퍼 드레인), 드레인 배치형태, 1의 경우 : 샌드 드레인 지름(cm) 2의 경우 : 케이퍼 드레인 폭 및 두께(cm) 교란효과와 고려방법 (1. Hansbo방법 2. Leonard의 방법 3. $c_h=c_v$ 로 가정) 1의 경우 : 수평방향 압밀계수(cm^2/sec), 투수계수(cm/sec), 교란지역의 투수계수(cm/sec), 교란지역의 직경 2의 경우 : 수평방향 압밀계수(cm^2/sec)

(b) 단순 설계

지반조건	지층수, 지표면 위치(+/-m), 지하수위(+/-m), 각 지층의 두께(m), 각 지층의 단위중량(t/m^3), 각 지층의 자연함수비, 각 지층의 초기 간극비, 압밀계수(cm^2/sec)
설계조건	설계구조물의 종류(1. 도로 2. 유류저장탱크 3. 저층구조물) 1의 경우 : 도로폭(m), 길이(m), 단위중량(t/m^3) 2, 3의 경우 : 설계하중(t/m^2), 기초의 근입깊이(m), 기초의 폭(m)
배수공법	배수공법의 종류(1. 샌드 드레인 2. 케이퍼 드레인)

관리에서는 (1) s- δ /s법, (2) s- δ 법, (3) $\Delta\delta/\Delta t$ 법 등에서 성토와 지반의 안정성을 검토할 수 있다.

(6) 기타

ESOP은 입력된 각 층의 지층 조건을 도식화하는 기능, 계획 구조물에 의해 무처리 지반에서 발생하는 침하 및 지지력을 검토하여 지반개량의 필요성 여부를 판정하는 기능 그리고 자료의 입력을 요구할 때 입력해야 할 값들에 관계된 도표를 제시해 주는 기능을 가지고 있다.

4.5 ESOP 개발로 얻어지는 효과

선행재하 공법 설계 절차를 프로그램화한 ESOP 개발로 얻어지는 효과는 다음과 같다.

(1) 전문가 대체의 효과

선행재하 공법을 설계하기 위해서는 많은 지식과 경험을 가진 전문가가 필요한데, ESOP을 이용하면 설계에 경험이 없는 보통의 기술자도 컴퓨터와의 대화를 통해 계산에 필요한 설계 조건과 지반 조건 데이터의 입력만으로 공법을 설계할 수 있다.

(2) 시간, 비용의 절약

전문 기술자가 많은 시간과 노력을 들여서 복잡한 절차를 거쳐서 설계하는 내용을 약 1시간 정도의 시간과 소프트웨어 구입에 필요한 최소한의 비용 투입으로 얻어낼 수 있다.

(3) 결과의 정확성, 일관성

복잡한 계산과정에서 인간 전문가가 저지를 수 있는 계산상의 실수나 반복 계산에 따른 실수 등을 일으키지 않는다.

4.6 ESOP의 실행 예

ESOP을 도로 시공의 예제를 사용하여 실행

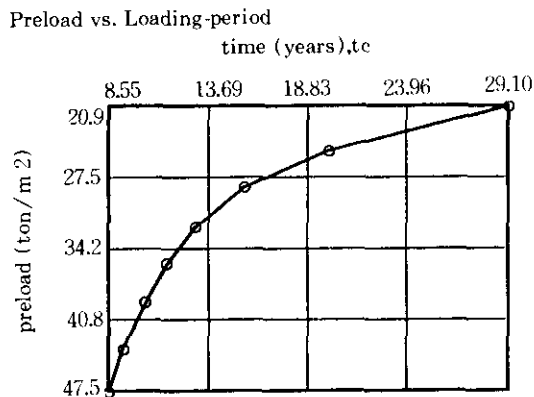


그림 8 선행하중과 압밀시간의 관계 곡선

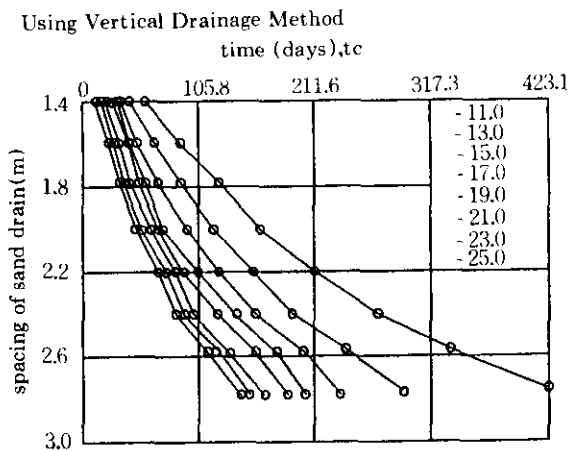


그림 9 배수 간격과 압밀시간의 관계 곡선

한 대표적인 예가 그림 8~그림 13에 나타나 있다. 한편, 선행재하 공법 설계 및 배수 공법 설계 그리고 최종 압밀 침하량의 예측 등의 계산 결과는 성토제방, 저장탱크, 5층 뼈대구조물, 2층 벽돌구조물 등 4가지 구조물에 대한 예제를 만들어서 손으로 계산한 값과의 비교를 하여 타당한 결과를 주는지 확인하였다.

5. 결론 및 남겨진 연구과제

이 논문에서는 가장 널리 사용되고 있는 지반개량 공법 중의 하나인 선행재하 공법 설계 절차를 체계화 정리하고, 정리된 내용을 바탕으로 전문가 시스템을 구축하였다. 개발된 전문가 시스템인 ESOP(expert system of preloading method)은 크게 연직배수 공법을 포함한 선행재하 공법 설계, 과거 시공사례 탐색, 현장 계측 관리 등으로 구성되어 있으며, 관련 기술자들이 손쉽게 사용하여 실설계에 이용할 수 있도록 하는데 중점을 두어 개발되었다.

선행재하 공법 설계에는 지반개량의 필요성 판정, 선행하중의 크기와 이에 대한 재하 시간 계산, 선행하중의 안정성 검토, 배수 시설의 크기 및 간격 결정, 그리고 교란 효과를 고려한 압밀 시간 계산, 다단계 재하의 설계 등을 포함하여 합리적이고 체계적으로 공법을 설계할 수 있게 하였으며, 설계 과정을 상세 설계와 단순 설계로 이원화하여, 입력 자료의 준비 상태 또는 사용자에게 따라서 설계과정을 선택하도록 하였다. 또한 ESOP은 시공사례들을 정리하여 데이터베이스화 함으로써 사용자가 선행재하 공법을 이해하는데 도움을 줄 수 있게 하였으며, 현장에서의 실측 자료를 이용한 최종 압밀 침하량의 예측을 포함하고 있어서 시공 도중의 계측을 통해 설계 과정을 수정할 수 있도록 하였고, 성토 및 지반의 안정성을 검토하는 안정관리를 포함하여 안전 시공을 할 수 있도록 하였다.

한편, ESOP은 CLIPS라는 개발 도구를 사용하여 워크스테이션(workstation) 환경 하에

SNU-SLOPE [Version 1.00] PROGRAM FOR STABILITY ANALYSIS

[1] Fellenius general method : 1.23

* Center of Circle C(40.00, 112.20)
 * Radius of Failure Circle : 30.54
 * Coordinate : A(24.00, 100.00) B(42.00, 112.00) FA(12.00, 100.00)

[2] Bishop's simplified method : 1.61

* Center of Circle C(26.00, 118.20)
 * Radius of Failure Circle : 18.31
 * Coordinate : A(24.00, 100.00) B(42.00, 112.00) FA(12.00, 100.00)

[M-key]:Method Selection [A-key]:Another Slope

[Another-key] : Exit

그림 10 사면안정 해석 프로그램 실행 결과

Design of Multi-step Loading				
step	Ht. of preload (m)	difference (m)	construction period (days)	loading-period (days)
1	2.91	2.91	58.11	58.11
2	6.99	4.09	81.70	81.70
3	Press any to continue.....			

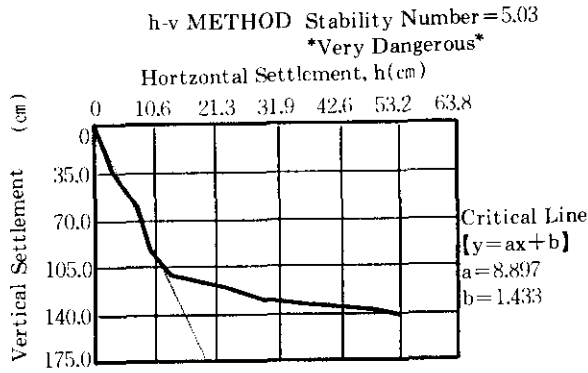
그림 11 다단계 재하 설계

Searching for Case History			
<Table of Similarities for each Project>			
Order	Project	Project Name	Similarities(%)
1	5	Stage Loading Using Vertical Drains	66.67
2	1	Preloading for Oil Tank Farm	55.00
3	3	Response to Preloading of Erratic Terrain	36.67
4	2	Performance Analysis of Sand Drain	31.67
5	4	Performance Analysis of Sand Drain	30.00

If you want to see the case history, please type the Project Number.
 (If you type any other key, exit this session.)

그림 12 시공사례 탐색

STABILITY CONTROL
(Embankment and Ground)



Press any key to continue...

그림 13 안정관리(s-δ 방법)

서 개발되었다. ESOP은 사용자 편의를 위하여 입출력 화면을 대부분 C언어로 구축하였으며, 이를 위하여 X-윈도우 시스템(window system)에서 제공하는 XLIB라는 그래픽 라이브러리를 사용하였다. XLIB는 워크스테이션 표준 그래픽 라이브러리(graphic library)이므로, ESOP은 대부분의 워크스테이션 기종에서 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

전문가 시스템은 수정 및 추가가 용이하기 때문에 지속적인 보완 작업을 통해서 ESOP 지식베이스의 질을 높여주어야 한다. 또한 개발된 전문가 시스템은 이론적이고 일반적인 사항들에 의해 구축되었으므로 현장 기술자 등 전문가들의 실행, 검토를 통해서 지식베이스의 추가 및 수정 작업이 계속해서 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 1991년도 목적기초연구(KOSEF-91-07-00-017) 지원금으로 이루어졌으며, 이에 사의를 표한다.

참고 문헌

- (1) Mitchell, J. K.(1981), "Soil Improvement, State of the Art Report", Proc. 10th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Vol. 4, pp.509~565.
- (2) Levine, R. I., Drang, D. E. and Edelson, B. (1986), A Comprehensive Guide to AI and Expert Systems, McGraw-Hill.
- (3) Maher, M. L.(1987), Expert System for Civil Engineers : Technology and Application, ASCE.
- (4) Brand, E. W. and Brenner, R. P(1981), Soft Clay Engineering, Elsevier, New York, pp. 637~696
- (5) Johnson, S. J.(1970), "Precompression for Improving Foundation Soils", J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE, (96), SM1, pp. 111~144
- (6) Aldrich, H.P.(1965), "Precompression for Support of Shallow Foundations", J. Soil Mech. and Found. Div. ASCE. (91), SM2, 5~20.
- (7) Stamatopoulos, A. C. and Kotzias, P. C. (1985), Soil Improvement by Preloading, John Wiley & Sons.
- (8) Skempton, A. W.(1957), "Discussion : The Planning and Design of New Hong Kong Airport", Proc. Inst. Civil Eng., Vol. 7. pp. 305~307
- (9) Hansbo, S.(1960), "Consolidation of Clay with Special reference to influence of vertical sand drains", Proc. Swed. Geotech. Instn., NO.18
- (10) Leonards, G. A.(1962), Foundation Engineering. McGraw-Hill, New York.
- (11) Barron, R. A.(1948), "Consolidation of Fine-grained Soils by Drain Wells", Transactions ASCE. (113), pp.718~754
- (12) Carillo, N.(1942), "Simple Two-and Three-Dimensional Cases in the Theory of Consolidation of Soils.", Journal of Mathematics and Physics. Vol. 21, No. 1
- (13) Kjellman, W.(1948), "Consolidation of Fine-grained Soils by Drain Wells.", Transactions ASCE. (113), Contribution to the Discussion.

- (14) Hansbo, S.(1979), "Consolidation of Clay by Bandshaped Prefabricated Drains, Ground Eng., Vol. 12. No. 5, pp.16~25
- (15) Bergado, D. T., Asakami, H., Alfaro. M. C. and Balasubramanian, A. S.(1991). "Smear Effect of Vertical Drans on Soft Bangkok Clay", ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering. Vol, 117, No. 10, pp. 1509~1530.
- (16) 日本土質工學會(1988) 軟弱地盤對策工法-調査, 設計, から施工まで"-.
- (17) Waterman, D.(1986), A Guide to Expert Systems, Addison-Wesley.
- (18) Adams, T. M. Christiano. P. and Hendrickson, C.(1989), "Some Expert System Applications in Geotechnical Engineering", Foundation Engineering : current principles and practices, ASCE, pp.885~902.
- (19) Aketo, S.(1990), Present Status of Expert Systems in Construction Companies. Taisei Corporation.
- (20) Trautmann, C.H. and Kulhawy. F. H(1991), "Artificial Intelligent and Geotechnical Engineering Design Software", Geotechnical News.
- (21) Giarratano. J. C.(1991), CLIPS User's Guied, NASA/Lyndon B. Johnson Space Center.
- (22) 이 계영 편저(1992), 입문 X-Window-Application Programming, 지산사.
- (23) Chameau, J. L. and Satamarina,, J. C., "Knowledge-Based Ststem for Soil Improvement", ASCE, J. of Computing in Civil Engng., Vol. 3. No. 3. 1989. pp.253~267
(접수일자 1994. 1. 11)