산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제26권 B호, 2006.
Journal of Industrial Technology, Kangwon Natl. Univ., Korea, No. 26 B, 2006.

확률론적 해석법에 의한 연직배수 영향인자 민감도 분석

Sensitivity Analyses of Influencing Factors on Vertical Drain with Probabilistic Method

유 남 재* 전 상 현** 정 길 수*** 김 동 건****
Yoo, Nam-Jae Jun, Sang-Hyun Jeong, Kil-Soo Kim, Dong-Gun

Abstract

A probabilistic analysis model, one of reliability analysis methods introducing the concept of probabilistic variables, was developed to investigate the uncertainty of dominant factors influencing the degree of consolidation in the radial consolidation theories.

Based on the developed probabilistic analysis model, sensitivity study of those factors was performed to find their trends of affecting the degree of consolidation in the vertical drain method. Various radial consolidation theories, proposed by Barron(1948), Hansbo(1979), Yoshikuni(1979) and Onoue(1988), were used for this parametric study with the influencing factors such as size of smear zone, reduction ratio of permeability in the smear zone, discharge capacity, permeability for horizontal flow and coefficient of consolidation for horizontal flow,

As results of this sensitivity study, for the given consolidation theory, contribution of each factor to the degree of consolidation was figure out and compared to each other. For the given value of each factor, the sensitivity to the degree of consolidation in the various theories was evaluated and their applicability and limitations were assessed.

키워드 : *연직배수재, 확률론적 해석, 영향인자, 민감도분석*
Keywords : *Vertical drain, Probabilistic analysis, Influencing factor, Sensitivity Analysis*

1. 서론

토지의 가용면적의 확대 및 해안부에 시공되는 항만건설 등에 의해 토질조건이 좋지 못한 해안이나 하안등에 위치한 연약지반을 활용해야 할 필요성이 계속적으로 높아지고 있다. 그런, 연약지반은 지지력이 매우 약하고 침하가 장기간에 걸쳐 크게 발생하는 경우가 대부분이며, 이러한 지반을 활용하기 위해서는 지반개량이 필수적인 요소로 오래전부터 여러 가지 형태의 공법이 개발 시행되어 왔다.

연약지반을 개량하는 공법으로는 개량목적과 대상지반 등에 따라 치환, 프리로딩, 연직배수, 전기침투, 침투압, 진동다짐 등 여러방법이 있으며, 특히

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사
* 강원대학교 대학원 토목공학과 박사수료
** 강원대학교 토목공학과 박사후 과정, 공학박사
*** 강원대학교 대학원 토목공학과 석사과정

연약한 점성토 지반의 압밀을 촉진하기 위한 공법으로는 연직배수공법이 대표적으로 적용되고 있다.

연직배수공법은 구조물 축조 또는 성토 등으로 발생되는 하중이 점토지반에 작용될 경우 장기간에 걸쳐 발생되는 압밀 침하를 소정의 기간 내에 종료시킬 목적으로 사용되는 지반개량공법의 일종으로 현재 국내외에서 널리 사용되고 있다. 현재 국내에서 사용되는 대표적인 연직 배수공법으로는 샌드 드레인(Sand Drain), 팩 드레인(Pack Drain) 및 플라스틱 보드 드레인(Plastic Board Drain)공법 등이 있는데, 이와 같은 연직 배수공법들은 배수재의 종류와 시공법상의 차이가 있을 뿐 연직배수재 설치로 인한 배수거리 감소에 따른 압밀촉진 효과를 기대하는 기본적인 원리는 동일하다.

이러한 연직배수재가 설치된 연약지반의 압밀해석은 방사형 압밀이론에 기초한 해석적인 해를 적용하고 있다. 방사형 압밀이론은 Barron(1948)에 의해 제시되었다. 그 후 Yoshikuni & Nakanodo(1974, 1979), Hansbo(1979, 1981), Onoue(1988) 등에 의해 배수재 타설에 따른 흙의 교란과 배수재의 통수능력을 고려한 해석이 개발되어 적용되고 있다.

이러한 연직배수재의 압밀해석에 있어서는 지반과 배수재가 필연적으로 가지게 되는 각종 지반정수의 편차 및 교란영향의 차이, 배수재 특성 평가오차 등의 많은 불확정 요인을 내포하고 있다. 일반적인 해석에서는 이러한 불확정 요인을 무시하고, 대표적인 값 하나에 대해서만 해석을 진행하는 결정론적 접근법(Deterministic Analysis)이 적용되었으며, 이는 극히 한정된 시료채취와 시험을 통해서 얻어지는 평균값을 적용하게 되므로, 연약지반의 압밀해석에 대해 신뢰도 높은 결과를 획득하기 어렵다.

따라서, 본 연구에서는 방사형 압밀이론의 주요 영향인자에 대해 불확실성을 고려할 수 있도록 확률변수(Probabilistic Value)의 개념이 도입된 신뢰성 해석의 확률론적 모델(Probability Analysis Model)을 개발하고, 이를 이용하여 연직배수재 매개변수의 민감도를 분석하는 것을 목적으로 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 방사형 압밀이론

연직배수공법은 연직으로만 발생하는 부처리지반의 배수방향에 더하여 수평방향의 방사형 배수를 복합적으로 작용시켜 연약토층의 압밀시간을 단축시키는 것을 목적으로 하고 있다. 일반적으로 연직배수재의 설치간격에 의해 수평방향으로 배수되는 거리가 연직방향으로 배수되는 거리에 비하여 상당히 작기 때문에 방사형으로 발생되는 배수가 지배적으로 크다. 특히, 원지반 상태에서의 수평투수계수가 지반의 구성상태에 따라 일반적으로 연직투수계수보다 크다는 것을 고려하면 연직배수재 적용시 방사형 배수는 더욱 중요한 사항이 된다.

따라서, 연직배수재를 적용하는 경우에 있어서 이론적인 검토는 방사형 압밀이론(Radial Consolidation Theories)을 주축으로 이루어지고 있고, 적정한 배수재의 타설간격 및 심도를 결정하기 위해서는 적용이론의 선정, 배수재의 배치방법, 배수재의 직경(등가경 또는 등가영향원) 등이 설계시 고려되어야 하고, 기타 고려되어야 할 사항으로 교란의 정도, 교란에 의한 지반의 투수계수의 변화, 배수재의 투수성 등이 반영되어야 한다.

2.2 스미어존과 통수저항

연직배수공법을 설계하는데 있어서 유의해야 할 주요사항으로는 공법적용시 압밀과정에서 발생하는 문제와 실제 지반의 불균일성을 어떻게 해석하여야 하는가의 문제이다. 연직배수재를 지반내에 타입하는 과정에서 맨드렐(Mandrel)이나 케이싱을 타입하고, 인발할 때 연직배수재 주변지반의 교란을 초래하게 되는데 이를 스미어 영역(Smear Zone)이라 하며 그 영향을 스미어 효과(Smear Effect)라 한다.

교란으로 인하여 지반의 수평방향 투수성이 저하되고, 압밀도의 산정에도 영향을 미치게 된다. 이러한 교란효과를 고려하지 않고 이상적인 연직배수로 가정하여 잔류과잉간극수압의 크기 및 압밀침하량 등을 예측하면 현장에서의 실측치와 상당한 차이를 보이게 된다. 즉, 지반의 교란은 압밀계수를 감소시키게 된다.

또한, 지반에 설치한 연직배수재내에서는 물의 흐름을 방해하는 저항력이 발생하게 되며, 이로 인하여 수두손실이 생기게 된다. 이렇게 발생된 수두손실을 웰 저항(Well Resistance)이라 하며 웰 저항 또한 스미어존과 마찬가지로 압밀의 진행을 방해하는 요소가 된다. 웰 저항은 연직배수재의 단면적 및 물의 흐름의 양에 영향을 주게 되는데, 연직배수재의 단면이 크거나 물의 통수성이 우수하고, 물의 흐름의 양이 작으면 그 영향은 작게 된다. 특히 플라스틱 보드 드레인(Plastic Board Drain)의 경우 실제로 심부의 압밀지연현상이 자주 발생하고 있다.

2.3 확률론적 해석방법

공학문제에 필연적으로 내재될 수 밖에 없는 임의성(Randomness), 불확실성(Uncertainty)에 대한 대비를 위해 기존의 결정론적 해석법에서는 주로 경험적으로 안전율(Safety of Factor)을 사용하여 여유 강도를 두어 이론상 파괴의 위험이 없는 것으로 가정한다. 그러나 확률론적 해석법에서는 지반이 갖는 불확실성 자체를 정량적으로 고려할 수 있도록 확률변수(Probabilistic Value)와 파괴확률(Probability of Failure) 개념을 도입하여 평가한다.

2.3.1 확률변수

지반-구조물 해석에서 확률변수란 해석에서 중요성을 갖거나 어떤 중요한 불확실성을 가진 설계정수를 의미한다. 확률변수는 하나의 값을 갖는 대신에 확률밀도함수(Probability Density Function) 또는 확률분포(Probability Distribution)에 따라 어떤 범위의 변동값을 가정한다. 확률분포는 주어진 범위 안에 그 값의 존재할 가능성을 정량화 시킨다. 일반적으로 지반정수에 있어서는 정규분포와 로그정규분포가 사용된다.

테일러 시리즈(Taylor Series)나 점추정 방법(Point Estimate Method) 을 이용한 확률변수 추정을 위해서는 기대치와 표준편차를 구해야 한다. 이들 값은 데이터나 경험에 의한 추정치를 이용하여 구할 수 있으며 서로 종속적이고 함께 변하는 경향이 있는 확률변수를 위해서는 상관관계수를 구해야 한다.

확률변수 x에 대한 N개의 측정치에 대한 평균값 μ_x는 다음의 식 (1)에 의해서 구하게 된다.

$$\mu_x = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i}{N} \tag{1}$$

확률변수의 기대값 E(x)는 평균값으로 모든 가능 확률변수에 그들의 발생가능성을 곱하고 더하여 구할 수 있다. 기대치의 불편향(Unbiased) 추정치를 알 수 있다면 대표 자료를 이용 평균값을 구할 수 있다. 그러므로 평균값과 기댓값은 수학적으로 동일하다. 기대값은 다음과 같이 식 (2)로 정의된다.

$$E(x) = \mu_x = \int x f(x) dx \approx \sum x_p(x_i) \tag{2}$$

여기서, f(x) : x의 확률밀도함수(연속확률변수), $p(x_i)$: x_i값의 확률(이산확률분포)

확률변수 x의 분산 Var(x)는 확률변수와 평균값의 차의 제곱에 대한 기대값이다. 자료가 있는 경우, 자료의 분산은 평균에서 각각의 변수값을 뺀 후 제곱하여 이들 값의 평균으로 식 (3)과 같이 구한다.

$$Var(x) = \frac{\sum[(x_i - \mu_x)^2]}{N} \tag{3}$$

x_i가 포함된 식 (3)은 정확히 N개의 요소를 포함하는 모집단의 분산을 구하기 위해 사용된다. 일반적으로 N은 전체모집단을 나타내는 확률변수와 관련된 분산을 추정하는데 사용된다. 유한개의 샘플에 대한 불편향 모집단을 추정하기 위해서는 N 대신 N-1을 사용한다.

기대치에 대한 확률변수의 분산도를 나타내기 위해서 사용되는 표준편차는 분산에 대한 제곱근으로 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$\sigma_x = \sqrt{Var[x]} \tag{4}$$

확률변수에 대한 불확실성을 나타내기 위해 무차원 값으로 표준편차를 기대값으로 나눈값을 변동계수(Coefficient of Variation)라 부르며, 식 (5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_x = \frac{\sigma_x}{E(x)} \tag{5}$$

(2) 파괴확률 및 신뢰성 지수

공학적 신뢰성 해석은 신뢰성, R 또는 구조물의 파괴 확률 Pr(f)를 구하는 것이다. 지반이 파괴되지 않는다면 신뢰성이 있는 것으로 간주되므로 신뢰성과 파괴확률의 합은 항상 1.0이다.

신뢰성 해석에서 파괴(Failure)란 용어는 유지관리상에 발생되는 간단한 구조물 결함을 포함하여 지반-구조물의 기능수행에 억행되는 일이 발생함을 의미할 수 있다. 이때 파괴는 완전한 붕괴(Catastrophic Failure)와는 다른 의미로 불완전 기능수행 확률(Probability of Unsatisfactory Performance)이란 용어로 Pr(u)가 사용되기도 한다.

본 연구에서 적용되는 파괴확률은 연직배수재의 압밀해석으로 구한 압밀도 결과가 소정의 요구되는 압밀도에 도달하지 못할 가능성으로 식 (6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Pr(f) = P[(U_r - U_c) < 1] \tag{6}$$

여기서, Ur : 요구되는 압밀도, Uc : 신뢰성 해석에 의한 압밀도

신뢰성 해석에서 평가의 지표로는 파괴확률과 신뢰성 지수(Reliability Index), β를 사용한다. 정규 표준화에 의한 신뢰도 지수는 지반에 가해지는 하중 또는 요구되는 기준값, L과 그에 대한 지반의 저항 또는 도달되는 기준값, R에서 다음식 (2.15)와 같이 정의될 수 있다.

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_R - \mu_L}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2}} \tag{7}$$

여기서, μ : 각 조건에서의 기댓값, σ : 각 조건에서의 표준편차, Z : 설계기준, Z = R - L

본 연구에서는 신뢰성 지수와 파괴확률 개념을 도입하여 방사형 압밀해석의 확률론적 결과에 대해 평가하였다. 여기서, 요구되는 압밀도는 확률변수가 아닌 확정적인 값으로 적용하였다.

3. 확률론적 해석방법 개발

방사형 압밀이론에 적용되는 주요한 인자들은 원지반의 물성치와 배수재 타설에 의한 교란영역의 크기 및 투수성, 배수재의 통수능력 등에 대하여 각 변수들이 갖는 불확실성을 고려하기 위해

이들에 대해 확률변수로 적용하였다. 또한, 방사형 압밀이론에 따른 압밀거동 결과를 비교할 수 있도록 일반적으로 사용되고 있는 4가지의 제안식을 선정하여 이에 대한 각각의 확률론적 해석모델을 개발하였다.

3.1 확률변수의 선정

지반의 특성을 나타내는 각종 물성치의 통계적 특성은 Lumb(1966), Wu & Kraft(1967)에 의한 국외연구는 물론 최근에는 국내에서도 많은 연구가 이루어지고 있다. 이들의 연구결과에 의하면 각종 지반정수들의 확률분포는 정규분포나 대수정규분포를 보이는 것으로 알려져 있다.

본 논문에서는 방사형 압밀이론의 확률론적 해석에 적용되는 인자중에 주요변수에 대하여 확률변수로 적용하고, 확률분포는 식 (8)과 같은 정규분포로 가정하여 적용하였다. 확률분포로 적용되는 주요변수로는 스미어존의 직경비($s=d_s/d_e$), 스미어존에서의 투수계수의 감소비($\eta=k_h/k_s$), 배수재의 통수능력(q_w), 원지반의 수평압밀계수(C_h), 원지반의 수평투수계수(k_h)이다.

$$f(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{(2\pi)}}\,e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{x-\mu}{\sigma}\right]^2} \qquad (8)$$

여기서, x는 확률변수, μ는 평균, 그리고 σ는 분산을 의미한다.

확률변수로 적용되는 입력자료는 정규분포하는 난수(Random Number)를 발생시켜 연직배수재 압밀해석을 하게 되는데, 본 연구에서는 난수를 발생시키는 방법으로 다양하게 적용되면서 간단하게 적용할 수 있는 Monte Carlo Simulation(Greco, 1996)을 이용했다.

Monte Carlo Simulation은 복잡한 적분이나 Taylor 급수를 푸는 과정, 그리고 하나 이상의 확률변수의 확률분포를 계산하는데 매우 적합한 방법이다. 이렇게 발생된 난수는 Box-Muller Method(William 등, 1992)에 의해 정규분포의 확률변수로 입력된다.

3.2 확률론적 해석모델 프로그램의 개발

본 논문에 적용된 KNUPAVD(Kangwon Natl. University Probability Analysis for Vertical Drain) 프로그램은 방사형 압밀이론을 위한 주요인자를 확률변수로 적용하여 연직배수재의 확률론적 압밀거동을 평가하는 프로그램이다.

이 프로그램은 일정한 형식의 ASCII형태의 파일을 통하여 연직배수재 압밀해석에 필요한 각종 인자가 입력된다. 이 파일에는 배수재 환산직경, 배수재의 배열형태, 연약지반 층후, 연약지반의 연직압밀계수, 배수조건, 압밀기간, 배수재 설치간격 등의 결정론적 변수와 스미어존의 직경비, 스미어존에서의 투수계수의 감소비, 배수재의 통수능력, 원지반의 수평압밀계수, 원지반의 수평투수계수 등의 확률변수가 입력된다. 이렇게 입력된 각종 변수들은 Monte Carlo Simulation과 Box-Muller Method를 통해 각 확률론적 해석을 위한 반복수행시마다 각각 다른 확률변수들로 입력되면서 반복적으로 연직배수재 압밀해석을 수행한다.

또한, 프로그램의 확률론적 해석을 위해 적용된 모델은 연직배수재의 압밀해석을 위해 국내·외에서 주로 사용되고 있는 Barron(1948), Hansbo (1979), Yoshikuni(1979), Onoue(1988)의 4가지 방사형 압밀이론 모두를 적용하였다. 따라서 프로그램 결과로는 각 제안식에 따른 각각의 압밀해석결과가 수평 및 전체압밀도로 계산되어 출력된다.

본 프로그램은 Fortran의 컴퓨터언어를 사용하여 작성되었으며, 컴파이러는 Visual Fortran을 사용하였다. 입력된 확률론적 변수는 부 프로그램에 의해 정규분포를 갖는 난수로 발생되며, 이러한 난수와 결정론적 변수가 각 반복수행 횟수마다 각각의 방사형 압밀이론 제안식에 의해 수직 및 수평, 전체 압밀도를 산정하게 된다. 이렇게 산정된 결과는 결과가 요약되어 있는 파일과 각 제안식의 결과를 상세하게 나타내는 파일 등 지정된 몇 개의 출력파일에 저장된다.

4. 매개변수 민감도 분석

4.1 분석개요

개발된 확률론적 모델에 의한 방사형 압밀해석을 위해서는 수평압밀계수 및 스미어존 범위, 스미어존에서의 수평압밀계수, 웰 저항요소 등 여러 인자들이 요구된다. 이러한 여러 인자들이 신뢰성 개념에 의해 확률변수로 정의되고, 이 확률변수를 각각의 방사형 압밀이론 해석방법을 이용하여 불확실성이 고려된 확률론적 개념의 압밀도를 평가하게 된다. 이와 같은 여러 인자들이 각각의 방사형 압밀해석에 미치는 영향을 분석하고 또, 상대적으로 어떠한 매개변수가 어떠한 해석방법에 더 민감하게 영향을 미치는가를 검토하기 위하여 다음과 같이 민감도 분석을 실시하였다.

매개변수의 민감도 분석을 위한 압밀대상지층의 지반조건은 국내 동해안의 00지역 연약지반 토질정수를 참조하여 그림 1과 같이 설정하였다. 그림 1에서는 보는 바와 같이 해석대상 지반은 30.0m의 두께를 갖는 양면배수 압밀대상층이며, 연직배수재로는 PBD(Plastic Board Drain)이 사각형 배열로 타설되어 있는 것으로 고려하였다.

연약지반 및 배수재의 토질정수는 압밀대상지반과 관련하여 연직압밀계수(C_v)는 $5.0\times10^{-4}cm^2/sec$, 수평압밀계수(C_h)는 $1.0\times10^{-3}cm^2/sec$, 수평투수계수(k_h)는 $1.0\times10^{-7}cm/sec$으로 설정하였다. 또한, 배수

재와 관련된 입력값으로 배수재 환산직경(d_w)는 5.0cm, 배수재 타설간격(d_e)는 1.2m, 배수재의 통수능력(q_w)는 2.0cm^3/sec, 스미어존의 크기(d_s)는 22.5 cm, 스미어존에서의 수평투수계수(k_s)는 2.0×10^{-7} cm/sec을 적용하였다.

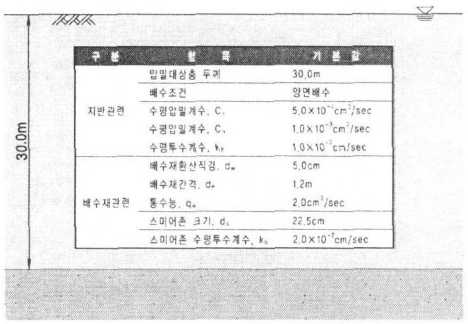

그림 1 매개변수 분석을 위한 가상지반 조건

위와 같이 매개변수 기본값으로 각 방사형 압밀이론에 대한 결정론적인 해석방법에 의해 수평압밀도를 구한 결과, Barron식은 92.92%. Hansbo식은 78.37%, Yoshikuni식은 85.62%, Onoue식은 74.24%의 압밀도로 산정되었다. 산정된 결과를 아래 표 1에 정리하였다. 여기서, 평균압밀도, U_{avg}는 Carrillo(1942)가 제안된 식을 적용하였다. 스미어존 및 웰저항을 고려하지 않는 Barron식이 가장 큰 압밀도를 나타났으며, 웰저항만을 고려하는 Yoshikuni식이 두 번째로 큰 압밀도로 나타났다. 또한, Hansbo와 Onoue식은 스미어존과 웰저항을 고려하기 때문에 수평압밀도가 78.37% 및 74.24%로 비교적 작은 값을 보이고 있다.

표 1 결정론적 해석결과

구 분	수직압밀도 Uv	수평압밀도 Uh	평균압밀도 U_{avg}
Barron(1948)	6.63%	92.92%	93.39%
Hansbo(1979)	6.63%	78.37%	79.81%
Yoshikuni(1979)	6.63%	85.62%	86.58%
Onoue(1988)	6.63%	74.24%	75.95%

가정한 조건에 대해 스미어존 및 웰저항 영향에 의한 수평방향의 압밀지연 효과를 분석하기 위해 다음과 같은 조건에 대해 검토하였다 스미어존의 영향을 분석하기 위하여 웰저항을 최소화하여 스미어존에 의한 영향만이 반영된 결과를 도출하였다. 또한, 웰저항에 의한 영향을 분석하기 위하여 스미어존의 영향을 최소로 하도록 배수재 환산직경 5cm와 같이 가정하여 웰저항 영향만이 반영된 결과를 도출하였다. 그 결과를 표 2에 요약하였다.

표 2에서 보는 바와 같이, 웰저항을 최소로 하여 스미어존만을 고려하였을 경우는 Barron과 Hansbo 제안식에서는 92.92%로 같은 값이 도출되었고, Yoshikuni와 Onoue 제안식에서는 각각 81.12%와 81.15%로 유사한 값이 도출되었다. 그러므로 본 장에서 가정된 조건에서 스미어존 범위의 영향에 의해 수평압밀도는 11.8%의 지연효과가 있는 것으로 나타났다.

스미어존의 범위를 배수재 환산직경, d_w=5.0cm로 하여 그 영향이 무시되는 조건에서는 Hansbo 제안식에서는 90.18%, Yoshikuni와 Onoue 제안식에서는 85.62%의 수평압밀도가 산정되었다. 그러므로 웰저항계수, F_r을 사용한 Hansbo 제안식에서는 2.7%, 웰저항계수, L을 사용한 제안식에서는 7.3%의 웰저항에 의한 압밀지연 효과로 분석되었다.

표 2 스미어존 및 웰저항 영향 검토

구 분		수평압밀도, Uh
스미어존 영향검토	Barron	92.92% (0%)
	Hansbo	81.12% (-11.8%)
	Yoshikuni	92.92% (0%)
	Onoue	81.15% (-11.8%)
웰저항 영향검토	Barron	92.92% (0%)
	Hansbo	90.18% (-2.7%)
	Yoshikuni	85.62% (-7.3%)
	Onoue	85.62% (-7.3%)

4.2 스미어존의 범위비

스미어존의 범위비를 평균값, S_{basic}=4.5에 대하여 0.5~1.5배의 크기인 S_{value}=2.25~6.75의 범위로 변경하면서, 각 제안식에 따른 연직배수재의 압밀해석을 수행하였다.

민감도 분석결과, 스미어존 직경비에 따른 압밀도를 나타내는 그림 2에서 보는 바와 같이 스미어존의 직경비가 증가할수록 스미어존을 고려하는 제안식에서는 압밀도가 감소하는 것으로 나타났다. Hansbo 및 Onoue의 제안식의 감소경향은 매우 유사한 것을 보이고 있다. 그림 3은 스미어존 직경비에 따른 압밀도의 변화를 기준값에 대한 변화비율로 나타낸 그림이다.

그림에서 보는 바와 같이 스미어존의 크기를 50%감소하였을 경우 Hansbo 및 Onoue 제안식에서 압밀도 6.8%의 증진효과가 발생하는 것으로 나타났다. 스미어존의 크기를 50% 증가할 경우에는 3.7~3.8%의 지연효과로 나타났다. 그러므로, 스미어존 크기의 증가에 따라 압밀도는 감소하며, 그 감소폭은 점차 작아지는 것으로 나타났다.

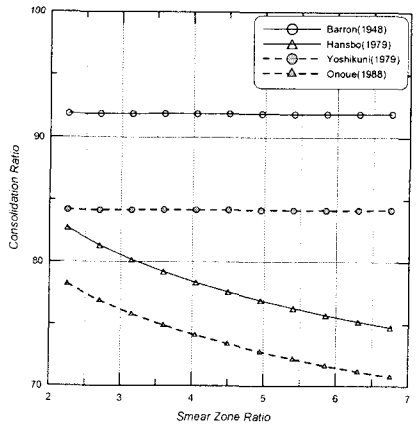

그림 2 스미어존 직경비에 따른 압밀도

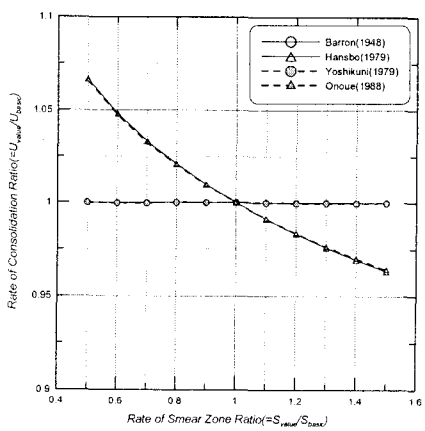

그림 3 스미어존 직경비에 따른 압밀도 변화비

4.3 스미어존의 투수계수 감소비

스미어존의 투수계수 감소비 평균값을 n_{basic}=2.0에 대하여 0.5~1.5배의 크기인 n_{value}=1.0~3.0범위로 변경하면서, 각 제안식에 따른 연직배수재의 수평압밀도를 산정하였다. 스미어존의 투수계수 감소비 변화에 따른 분석결과를 그림 4와 그림 5에 나타내었다.

그림 4에서 스미어 효과를 고려하지 않는 Barron과 Yoshikuni에 따른 압밀도는 변하지 않으며, Hansbo와 Onoue식에서는 선형에 가까운 경향으로 감소하고 있다. n_{value}=1.0에서는 웰저항에 대해 동일한 이론이 적용된 Yoshikuni와 Onoue식은 같은 결과를 보인다. Hansbo식은 n_{value}=1.0일 때, 압밀도가 88.96%, n_{value}=3.0에서는 67.87%로 21.09%감소하였다. Onoue식은 nvalue=1.0일 때, 압밀도가 84.23%, n_{value}=3.0에서는 64.42%로 19.81%감소하였다.

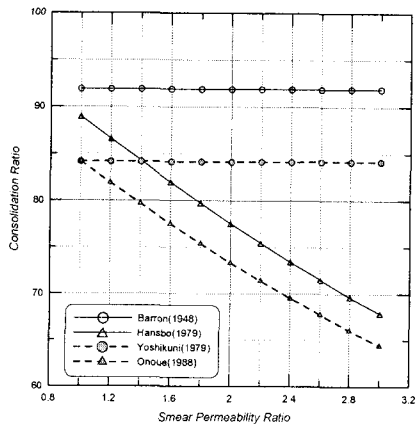

그림 4 스미어존 투수계수 감소비에 따른 압밀도

그림 5는 스미어존 투수계수 감소비 변화에 따른 압밀도 변화를 기준값의 결과로 나누어 그 비율을 나타낸 그림이다. Barron과 Yoshikuni식은 스미어존을 고려하지 않으므로 수평압밀도의 변화가 없으며, Hansbo와 Onoue식은 매우 유사한 경향을 나타내고 있다. 스미어존 투수계수 감소비가 0.5배인 n_{value}=1.0에서는 115%(=1.15)의 압밀도 증가효과를 보이며, 기준값의 1.5배인 n_{value}=3.0에서는 87%(=0.87)의 압밀도를 보이는 것으로 나타나고 있다.

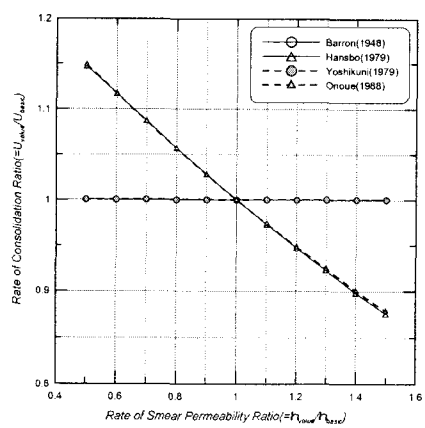

그림 5 스미어존 투수계수 감소비에 따른 압밀도 변화비율

스미어존 영향에 대한 인자인 스미어존 직경비에 대해 Hansbo와 Onoue의 분석결과로부터, 두 제안식이 분석하는 스미어존에 의한 압밀도 지연의 정량적인 값은 다르나 정성적인 경향은 동일하게 유도된 압밀이론임을 확인할 수 있었다.

4.4 통수능력

통수능력에 대한 매개변수 민감도 분석은 그 평균값인 $q_{w\text{-}basic}$=2.0cm^3/sec에 대하여 0.5~1.5배의 크기인 $q_{w\text{-}value}$=1.0~3.0cm^3/sec범위로 변경하면서, 제안식에 따른 연직배수재의 수평압밀도를 산정하였다. 분석결과를 그림 6, 그림 7에 나타내었다.

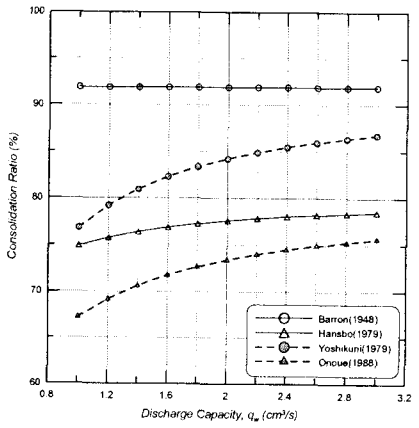

그림 6 통수능력에 따른 압밀도

그림 6에서 웰저항을 고려하지 않는 Barron식은 압밀도가 일정하게 산정되었다. $q_{w\ value}$=1.0, 2.0, 3.0 cm^3/sec일 때, Hansbo식에서는 각각 74.87, 77.58, 78.47%의 압밀도로 나타났으며, Yoshikuni식에서는 76.81, 84.19, 86.75%, Onoue식에서는 67.19, 73.38, 75.61%의 압밀도로 분석되었다. Hansbo식이 Yoshikuni 및 Onoue식에 비해 압밀도의 변화량이 작은 것으로 나타났다.

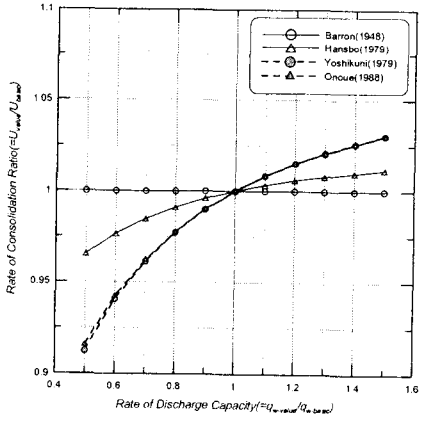

그림 7 통수능에 따른 압밀도 변화비율

그림 7에서 Hasnbo식이 웰저항을 고려하는 나머지 2개의 제안식에 비해 압밀도의 변화량이 작게 나타나고 있다. 또한, 웰저항이 고려되는 제안식에서는 통수능력이 증가할 때보다 감소할때의 압밀도의 변화 폭이 더 큰 것으로 분석되었다.

이는 통수능력의 인자가 방사형 압밀이론에서 지수함수로 적용되기 때문에 실제 통수능력이 증가함에 따라 압밀도의 증가 효과보다는 통수능이 감소할 때 압밀도의 지연현상이 매우 심하게 발생할 수 있다. 그러므로 통수능력의 감소량이 커진다면 압밀이 매우 더디게 진행된다.

또한, 통수능력에 대한 결과에서 모두 Hansbo식이 Yoshikuni 및 Onoue식에 비해 통수능력에 의해 압밀도에 미치는 영향이 작게 나타났으므로 지반의 수평투수계수등에 의해 그 정도가 다르기는 하겠으나 전반적으로 웰저항에 민감한 것은 Yoshikuni와 Onoue식이라 판단할 수 있다.

4.5 수평압밀계수

수평압밀계수를 평균값, C_h=1.0×10^{-3}cm^3/sec에 대하여 0.5~1.5배의 크기인 0.5~1.5×10^{-3}cm^3/sec의 범위로 변경하면서, 각 제안식에 따른 연직배수재의 압밀해석을 수행하였다. 수평압밀계수에 따른 압밀도는 그림 8과 그림 9에 나타내었다.

그림 8의 확률론적 매개변수 민감도 분석 중 수평압밀계수의 따른 압밀도 분석결과에서, 수평압밀계수가 증가할수록 수평압밀도는 증가하는 경향으로 보이며, 압밀도 증가량은 수평압밀계수가 커짐에 따라 점차 작아지는 경향으로 나타났다.

그림 9는 수평압밀계수의 변화에 따른 압밀도의 변화를 기준값에 의해 정규화한 비율로 나타낸 그림이다. 수평압밀계수의 변화에 따라서 압밀도에 미치는 영향은 Barron, Yoshikuni, Hansbo, Onoue 제안식 순으로 영향을 미치는 것으로 나타났다.

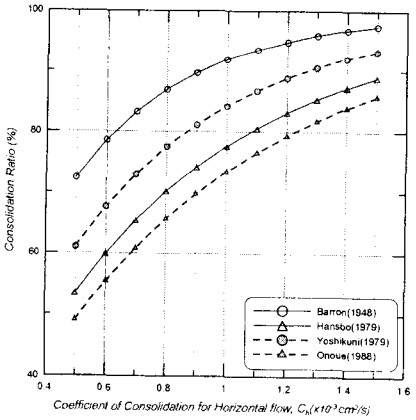

그림 8 수평압밀계수에 따른 압밀도

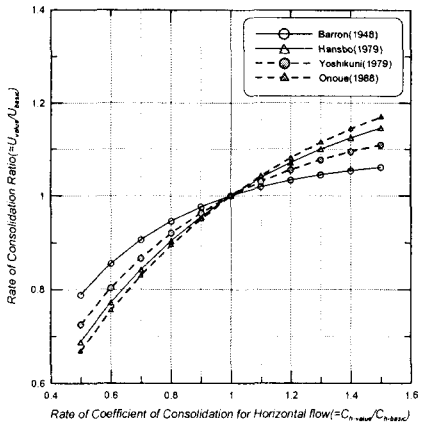

그림 9 수평압밀계수에 따른 압밀도 변화비율

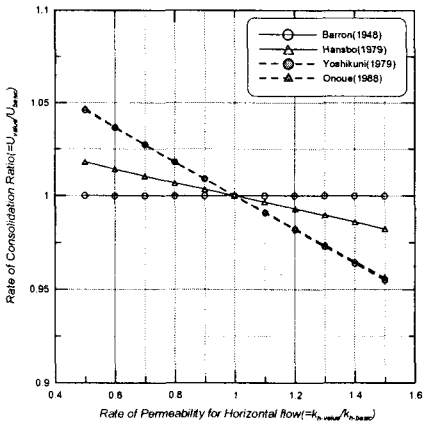

그림 11 수평투수계수에 따른 압밀도 변화비율

4.6 수평투수계수

수평투수계수에 대한 민감도 분석을 위해 평균값, k_h=1.0×10^{-7}cm/sec에 대하여 0.5~1.5배의 크기인 0.5~1.5×10^{-7}cm/sec의 범위로 변경하면서, 각 제안식에 따른 연직배수재의 압밀해석을 수행하였다.

그림 10과 그림 11에서 보는 바와 Barron식을 제외하고, 수평투수계수의 증가에 따라 압밀도가 선형적으로 감소하는 경향으로 나타났다. 이는 방사형 압밀해석에서 수평방향 투수계수가 스미어존의 투수계수 감소비,n 및 웰저항의 영향인자 중 하나이기 때문으로 특히, 수평방향투수계수가 웰저항을 증가시키는 영향으로 작용한 결과이다.

압밀도의 감소는 Hansbo식에 비해 Yoshikuni와 Onoue가 동일한 경향으로 보다 크게 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다. 그러므로 통수능력의 결과와 마찬가지로 웰저항에 있어 Hansbo식에 비해 Yoshikuni와 Onoue식이 보다 민감하게 해석된다고 할 수 있다.

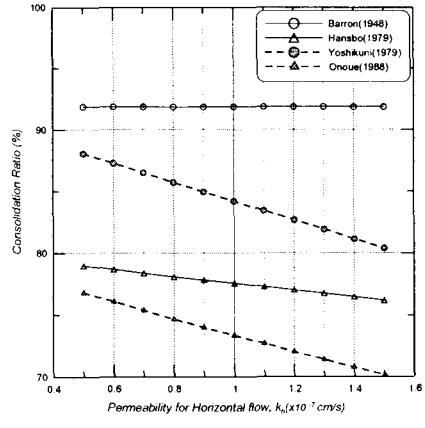

그림 10 수평투수계수에 따른 압밀도

4.7 각 제안식별 매개변수 분석

4.2~4.6절에서 분석한 해석결과로부터 각 제안식에 따른 입력인자가 압밀도에 미치는 민감도의 크기를 비교하였다.

4.7.1 Barron(1948) 제안식

Barron에 의해 분석한 매개변수에 따른 압밀도 변화를 그림 12에 나타내었다.

Barron 제안식은 스미어와 웰저항의 효과를 고려하지 않으므로 매개변수 민감도 분석을 실시한 주요 변수 가운데 스미어존 직경비, 스미어존 투수계수 감소비, 통수능력, 지반의 수평투수계수등에 대해 영향을 미치는 않는 것으로 분석되었으며, 수평압밀계수만이 그 크기가 증가할수록 압밀도의 증가량이 감소하는 비선형적인 경향으로 나타났다.

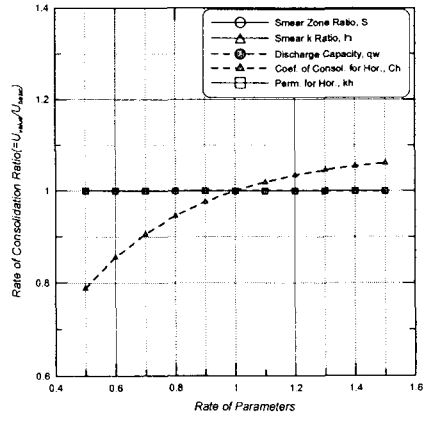

그림 12 Barron식의 매개변수 민감도분석

4.7.2 Hansbo(1979) 제안식

Hansbo에 의해 분석한 매개변수에 따른 압밀도 변화를 그림 13에 나타내었다.

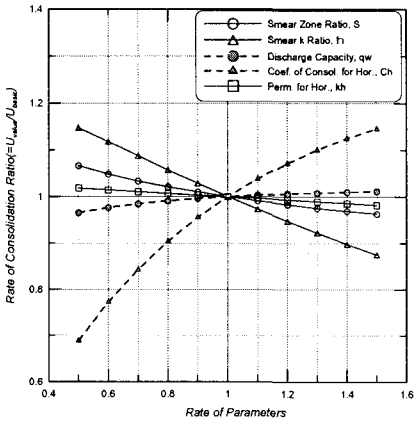

그림 13 Hansbo식의 매개변수 민감도분석

그림에서 보는 바와 같이 매개변수의 변화에 따라 압밀도에 미치는 영향은 수평투수계수, 통수능력, 스미어존 직경비, 스미어존 투수계수 감소비, 수평압밀계수의 순으로 그 크기가 크게 나타났다. 특히, 매개변수의 크기가 작아질 경우에는 수평압밀계수에 의한 압밀도에 영향이 다른 매개변수에 비하여 월등하게 크게 나타났으나, 매개변수의 증가시에는 수평압밀계수와 스미어존 투수계수 감소비가 유사한 비율로 영향을 주었다. 이는 스미어존 투수계수의 감소비에 의한 압밀도의 선형적인 변화에 반하여 수평압밀계수는 비선형적인 영향으로 값이 증가함에 따라 점차적으로 압밀에 미치는 영향이 감소하기 때문이다.

4.7.3 Yoshikuni(1979) 제안식

Yoshikuni에 의한 매개변수의 민감도 분석결과를 그림 14에 각각 나타내었다. 이 제안식은 스미어의 영향을 고려하지 않으므로 스미어존 직경비와 스미어존 투수계수 감소비는 압밀도를 변화하지 않았으며, 수평투수계수, 통수능력, 수평압밀계수의 순서로 영향의 크기가 크게 나타났다. 특히, 수평압밀계수의 영향은 다른 매개변수 보다 상당히 큰 영향으로 분석되었다.

4.7.4 Onoue(1988) 제안식

Onoue식에 의해 분석한 매개변수에 따른 민감도 분석결과를 그림 15에 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 매개변수의 변화에 따라 압밀도에 미치는 영향은 수평압밀계수가 가장 크며, 스미어존의 투수계수 감소비가 그 다음으로 나타났다. 수평투수계수, 통수능력, 스미어존 직경비는 매개변수의 증가와 감소에 따라 그 순서가 다소 변화하는 것으로 분석되었으나 전반적으로 유사한 영향을 보여주고 있다.

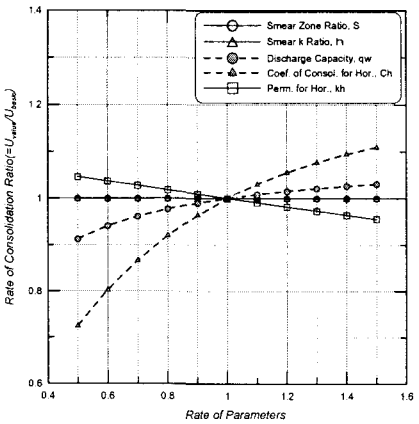

그림 14 Yoshikuni식의 매개변수 민감도분석

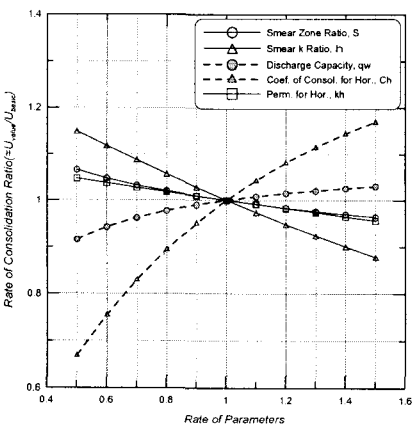

그림 15 Onoue식의 매개변수 민감도분석

5. 결론

본 연구는 연직배수재 해석에 대한 방사형 압밀이론을 근간으로 매개변수의 불확실성을 고려하여 신뢰성 해석에 적용 가능한 확률론적 접근법을 적용한 수치해석 기법을 개발하고, 이에 대한 매개변수 민감도 분석을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 방사형 압밀이론식에 따라 스미어존 직경비, 스미어존 투수계수 감소비, 배수재 통수능력, 수평압밀계수, 수평투수계수의 매개변수 민감도 분석을 실시하였다.

둘째, 매개변수 민감도 분석 결과, 스미어존 직경비 및 스미어존 투수계수 감소비는 값이 증가할수록 압밀도가 감소하는 경향으로 Hansbo(1979)와

Onoue(1988)의 제안식에서 나타났으며, 통수능력이 증가함에 따라 Barron(1948) 제안식을 제외하고 압밀도가 비선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 수평압밀계수 증가에 의해서는 모든 제안식에서 압밀도가 비선형적으로 증가하였으며, 수평투수계수의 증가에 의해서는 Barron 제안식 이외에서 압밀도가 감소하는 경향으로 나타났다.

셋째, 각 제안식별로 주요인자에 대해 매개변수 민감도 분석을 실시한 결과, Barron 제안식에서는 수평압밀계수만이 압밀도에 영향을 주는 것으로 분석되었고, Yoshikuni(1979) 제안식에서는 수평압밀계수, 통수능력, 수평투수계수의 순으로 압밀도에 영향을 미치는 것으로 검토되었다. 스미어 및 웰저항이 모두 고려되는 Hansbo 및 Onoue 제안식에서는 수평압밀계수, 스미어존 투수계수 감소비 순으로 다른 인자에 비해 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

향후에는 여러 매개변수의 좀 더 적절한 확률분포함수 적용 및 연직배수재 공법의 신뢰성 해석에 있어 파괴확률 및 신뢰도 지수의 기준에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] Barron, R. A., "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells", Transactions, *ASCE*, Vol.113, No. 2346, pp.718~754, 1948

[2] Carillo, N., "Simple Two and Three Dimensional Cases in Theory of Consolidation of Soils", *Journal of Mathmatics and Physis*. Vol. 21 No. 1, pp. 11~18, 1942

[3] Greco, V. R., "Efficient Monte Carlo Technique for Location Critical Slip Surface", *J. of Geotech. Eng. Div., ASCE*, Vol. 122, No. 7, pp.517~525, 1996

[4] Hansbo, S., "Consolidation of Clay by Band-Shaped Prefabricated Drains", *Ground Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp.59~66, 1979

[5] Hansbo, S., "Consoldation of Fine grained Soils by Prefabricated Drains", *Proc. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Sweden, Vol.3, pp.677~682, 1981

[6] Onoue, A., "Consolidation by Vertical Drains Taking Well Resistance and Smear into Consideration", *Soils and Foundation*, JSSMFE, Vol.28, No.4, pp.165~174, 1988

[7] Onoue, A., "Consolidation of Multilayered Anisotropic Soils by Vertical Drains with Resistance", *Soils and Foundation*, JSSMFE, Vol.28, No.3, pp.75~90, 1988

[8] William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, Brian P. Flannery, "Numerical Recipes in Fortran : The Art of Scientific Computing", Cambridge University Press, 1992

[9] Yoshikuni, H., "Design and Construction Control of Vertical Drain Methods", *Gihodo, Tokyo. Foundation Engineering Series*, Dissertation, Hiroshima University(in Japanese), 1979

[10] Yoshikuni, H. and Nakanodo, H., "Consoldation of Soils by Vertical Drain Wells with Finite Permeability", *Soils and Foundations*, Vol, 14, No. 2, pp.35~46, 1974

[11] Yoshikuni, H., and Nakanodo, H., "Consolidation of Soils and Foundations", JSSMFE, Vol.14, No.2, pp.35~46, 1974