

지반 불확실성을 고려한 연직배수재 배치간격의 확률론적 해석과 결정

Probabilistic Analysis and Design of the Spacing of Prefabricated Vertical Drains Considering Uncertainties in Geotechnical Property

김 방 식¹ Kim, Bang-Sig

김 병 일² Kim, Byung-II

Abstract

The oedometer, radial CRS and Rowe cell tests, composite discharge capacity tests and smear effect tests are carried out to estimate the parameters for the reliability-based design of vertical drain method. Also the sensitivity analysis, the probabilistic and deterministic solutions of radial consolidation theory are presented. The result of probabilistic analysis was compared to that of deterministic analysis using the tested and estimated parameters. The results indicated that the drain spacing in the deterministic method is larger than that in the probabilistic method because the former does not consider the uncertainties in the geotechnical property. The divergence of two methods is dependent on the probability of achieving target degree of consolidation by a given time and the coefficient of variation (COV) of the coefficient of horizontal consolidation (c_h).

요 지

본 연구에서는 표준압밀, 방사형 일정변형속도 압밀, 로우셀압밀, 복합통수능 및 교란영역시험을 수행하여 연직배수공법의 신뢰성 설계를 위한 파라미터를 산정하였다. 또한 방사형 압밀이론에 대한 민감도 해석, 결정론적 해석 및 확률론적 해석이 수행되었다. 시험 결과를 이용한 방사형 압밀이론의 확률론적 해석 결과와 결정론적 해석 결과를 비교, 분석 하였으며, 그로부터 배수재 배치간격은 확률론적 방법보다 결정론적 방법에서 더 넓게 산정됨을 제시하였다. 이는 결정론적 해석에서는 지반 불확실성을 고려하지 못하였기 때문이다. 두 방법을 이용하여 산정된 배치간격간의 차이는 목표 압밀도에 도달할 수 있는 확률과 수평압밀계수의 변동계수에 영향을 받는 것으로 나타났다.

Keywords : Coefficient of variation, Probabilistic solution, Reliability-based design, Vertical drain

1. 서 론

자연현상에 크게 영향을 받아 생긴 재료를 대상으로 하는 지반공학에서는 여타 분야에 비해 설계재료의 공학적 특성을 파악하는 것이 상대적으로 어렵다. 뿐만 아니라 경제적, 시간적 이유로 구조물을 구성하는 재료 전체를 대상으로 시험하지 못하고, 극히 일부분만의 대상

에 대한 시험 결과를 가지고 전체 지반의 성질을 추정해야 하는 문제도 있다. 또한 구하자 하는 지반 특성이 재료자체의 고유한 특성(Inherent property)이 아니고 재료에 작용하는 현재의 응력상태, 과거의 응력이력, 시험장비의 특성 및 시험방법 등에 영향을 받는 경우가 대부분이다(김병일 등, 2006).

연약지반의 경우 침하량 계산시 지반조사의 종류와 그

1 정회원, 충주대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Chung Ju Univ.)

2 정회원, (주)이케이텍 기술연구소 선임연구원 (Member, Researcher, Research & Development Center, EJtech, geokbi@korea.com, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

특성 그리고 지반 자체의 불균질성(Heterogeneity)으로 인한 토질특성과 관련된 불확실성이 내재되어 있다. 뿐만 아니라 현재 이용되고 있는 계산방법 그 자체가 실제 조건을 단순화한 방법이다. 따라서 사용된 토질정수와 단순화된 계산방법으로 인하여 압밀시간 및 예측 침하량은 실측치와 많은 오차를 가지게 된다.

만약 실제 압밀기간 또는 침하량이 예측치보다 작게 나타나는 경우, 지반개량공법 자체가 불필요한 것이 아니라면 큰 문제를 유발하지 않겠지만 좀더 정확한 예측이 이루어진다면 공사비가 절감될 것이다. 압밀기간이 과소평가 되었다면 상황은 단순하지 않다. 특히 압밀기간이 예정 공사기간을 초과하게 된다면, 추가적인 지반개량공사가 필요하거나, 공기를 연장시켜야만 한다. 또는 최종 침하량이 예측 침하량보다 클 경우 설계 지반고에 도달하기 위해서는 추가적인 성토가 요구된다. 결국 경제적 손실이 일어나게 되므로 가급적 설계값과 실측값을 일치시키는 것이 바람직하다.

Lacasse et al.(1996)은 공간적변동성(Spatial variability)과 측정방법을 포함한 지반정수의 불확실성에 대해 연구한 바 있다. 그림 1은 안전율과 파괴확률 사이의 관계에 대하여 나타낸 것으로 결정론적 방법(Deterministic analysis)에 해당하는 안전율은 동일하지만(a) 확률론적 방법에서는 지반 물성치의 표준편차 차이에 따라 파괴확률이 크게 다르다는 것을 보여주고 있다(b). 즉, 기존 안전율의 개념을 기초로 하는 결정론적 방법의 경우 어느 정도의 안전여유(Safety margin)를 갖고 있는가를 파악하기 위하여 경험적인 안전율을 도입하고 있다. 이 경우 분산

(Variability)을 고려하지 않은 채 단일 대표값만을 이용하여 안전성을 판단하므로 가변성과 불확실성을 효과적으로 정량화하여 해석에 적용할 수 없는 단점이 있다. 반면에 확률론적인 해석 방법에서는 지반정수의 분산성 및 인위적인 오차에서 나타나는 불확실성을 보다 합리적으로 고려할 수 있다(강기민 등, 2006).

이상에서 제시한 바와 같이 연약지반 개량공법 설계를 위한 지반 및 연직배수재(이하 PVD) 관련 파라미터는 필연적으로 불확실성이 내재되어 있어 궁극적으로는 설계와 시공의 불일치가 발생할 수 있는바 신뢰성 있는 연약지반개량을 위해서는 불확실성을 고려한 설계가 이루어져야 한다. 그러나 국내의 설계 관행에서는 확률 및 통계이론이 어려운 학문일 것이라는 막연한 불안감 때문에 외국과는 달리 신뢰성 설계가 활발히 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 연직배수공법 설계에 이용되는 방사형 압밀이론의 확률론적 해석과 이에 기반을 둔 연직배수재 배치간격의 결정 방법에 대하여 제시하였다.

2. 이론적 배경

2.1 방사형 압밀이론의 결정론적 해석

연약지반개량을 위해 이용되는 연직배수공법의 경우 방사방향의 압밀과 연직방향의 압밀이 복합적으로 발생한다. 방사방향의 압밀은 연직방향의 압밀로 인하여 수평(방사)방향의 배수가 발생하는 조건을 말하는 것이

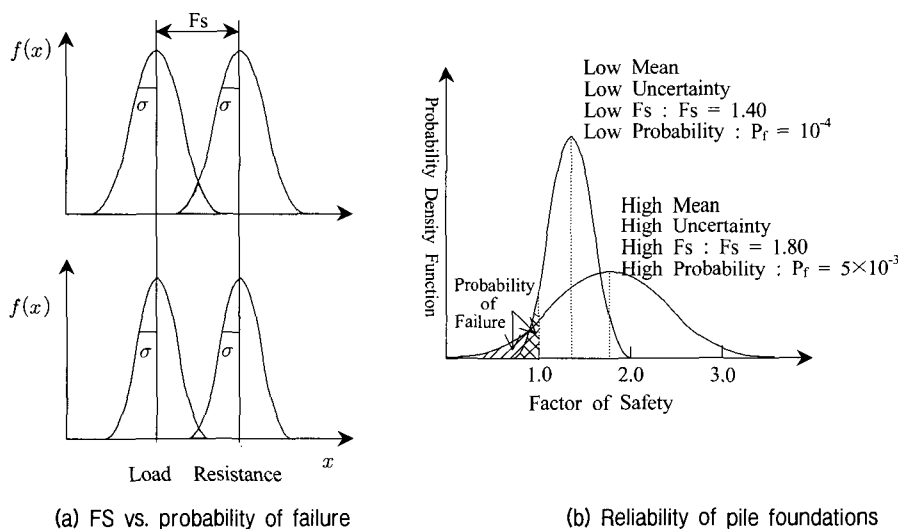


그림 1. 안전율과 파괴확률사이의 관계(Lacasse et al., 1996)

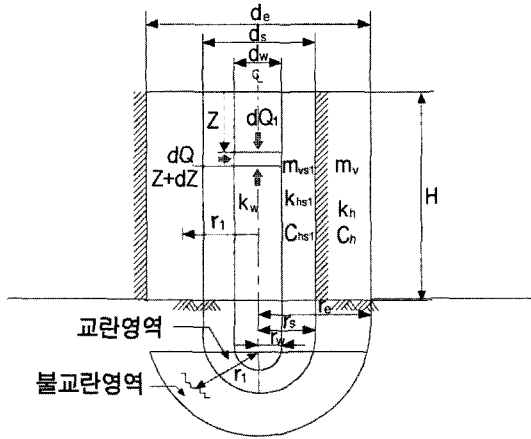


그림 2. 교란영역 모식도

다. 그림 2는 본 연구에서 이용한 연직배수공법의 해석 및 설계에 필요한 교란영역에 관한 모식도를 나타낸 것이다.

본 연구에서는 압밀이론을 해석함에 있어 계산상의 편의를 위해 연직변형은 등변형률 조건으로 간주하였으며 (Barron, 1948), 연직배수공법중 PVD를 사용하는 경우를 고려하고자 배수재 투수능을 고려하고, Darcy 법칙이 배수재를 따라 흐르는 흐름에 적용 가능하고, 지반은 균질하다고 가정하였다. 결과적으로 임의의 깊이에서의 수평방향의 평균 압밀도 $U_h(t)$ 는 다음과 같다(Hansbo 1981).

$$U_h(t) = 1 - \exp\left(-\frac{2c_h t}{r_e^2 F}\right) \quad (1)$$

여기서,

$$F = F_o + F_s + F_r \quad (2)$$

이다. F_o 는 배수재 간격 요소, F_s 는 지반의 교란 요소, F_r 은 배수저항 요소이다.

$$F_o = \ln(n) - \frac{3}{4} ; F_s = \left(\frac{k_h}{k'_h} - 1\right) \ln(\xi) ; F_r = \pi z(2L - z) \frac{k_h}{q_w} \quad (3)$$

여기서, L 은 연직배수 거리, z 는 배수경계면으로부터의 거리, k_h 는 불교란 지반의 수평방향 투수계수, k'_h 는 교란된 지반의 수평방향 투수계수, r_s 는 교란영역의 반지름, q_w 는 배수재의 투수능, $n = r_e/r_w$; $\xi = r_s/r_w$ 이다.

연약지반에서 연직배수가 발생할 때의 평균 압밀도 계산은 Rixner et al.(1986)이 제안한 전체 배수재 길이에 대한 평균 배수저항 요소인 F' , 을 사용한다(Hong

and Shang, 1998).

$$F'_r = \frac{2\pi L^2 k_h}{3 q_w} \quad (4)$$

만약 수평배수와 연직배수의 복합적인 영향을 고려하면 전체 압밀도는 다음과 같다(Carrillo, 1942).

$$U(t) = 1 - [1 - U_v(t)][1 - U_h(t)] \quad (5)$$

여기서, $U_v(t)$ 는 연직방향의 평균 압밀도이다(Terzaghi, 1948).

$$U_v(t) = 1 - 8 \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\exp[-A_i^2 c_v t / (2L)^2]}{A_i^2} \quad (6)$$

여기서, $A_i = \pi(2i + 1)$, i =정수.

만약 설계 파라미터의 불확실성을 고려하지 않는다면 소요 배수재의 간격, S 또는 소요 유효반경, r_e 의 값, r_{req} 는 식 (1)을 (5)에 대입하고 r_e 를 r_{req} 로 치환하여 얻은 비선형 방정식으로부터 계산할 수 있다.

$$r_{req}^2 F(r_{req}) = \frac{2t_s m_{ch}}{\ln \left[\frac{1 - U_s(t_s)}{1 - U_v(t_s)} \right]} \quad (7)$$

그러나 지반정수 및 관련 설계 파라미터는 시험 오차 및 고유 변동성과 같은 이유로 인하여 불확실성이 내재되어 있다. 따라서 이를 고려하기 위해서는 설계 파라미터의 불확실성을 고려한 압밀이론의 확률론적 해석이 수행되어야 한다.

2.2 방사형 압밀이론의 민감도 분석

본 연구에서의 민감도 분석은 연직배수공법 설계에 있어 최종 설계요소인 배수재의 배치간격 결정을 위한 유효반경에 대하여 수행하였다. 이때 적용된 요소는 투수계수비, 교란영역의 반경, 수평투수계수, 투수능, 수평 압밀계수 및 연직압밀계수 등이다(그림 3). 분석 범위는 초기 대표값에서 각 영향요소의 200%까지 5단계에 걸쳐 계산하였다. 최대 200%를 선정한 것은 이 값이 평균과 표준편차의 비로 표현되는 변동계수가 1일 때를 의미하는 값으로 그 이상의 값은 큰 의미가 없기 때문이다.

연직배수공법 설계시 중요한 설계 요소인 유효경에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 수평압밀계수(c_h)로 나타났다. 교란영역과 불교란영역의 투수계수비가 그 다

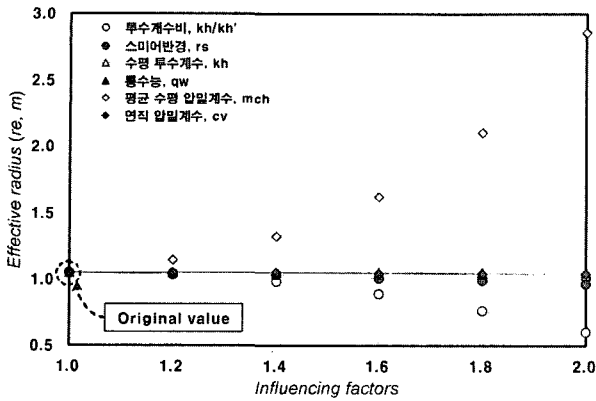


그림 3. 방사형 압밀이론의 민감도 분석

음순으로 나타내었다(그림 3). 이는 연직배수공법의 설계를 위해서는 수평압밀계수의 정확한 산정이 중요함을 나타낸 것으로, 방사형 압밀이론의 확률론적 해석에 있어 반드시 고려되어야 할 영향인자임을 나타내고 있다. 본 연구에서는 확률론적 해석을 위해 수평압밀계수를 확률변수(Random variable)로 채택하였다.

2.3 수평압밀계수의 확률분포 특성

방사형 압밀이론에 대한 확률변수가 수평압밀계수로 결정된 바 본 인자를 고려한 확률론적 해석을 위해서는 확률분포 특성이 먼저 규명되어야 한다. 국외의 경우 Lumb(1966)에 의하면 연직압밀계수는 정규분포특성을 보이지만 압축지수, 체적압축계수, 투수계수는 정규분포의 양상이 나타나지 않으며 특히 투수계수의 경우는 대수정규분포(Lognormal distribution)를 따르는 것으로 제시되어 있다. 또한, Christian et al.(1994) 역시 압축지수, 투수계수, 점착력, 마찰각 등이 정규분포를 따르지 않는다고 제안하였다.

본 연구에서는 국내에서 수행된 수평 Oedometer, 방사형 일정변형속도 및 로우셀 압밀실험 결과를 수집하여 수평압밀계수의 확률분포 특성을 살펴보았다. 분석에 이용된 수평압밀계수는 총 82개이며, 부산 OO지구 및 인천 OO 지역에서 채취된 시료에 대한 실험 결과이다.

그림 4와 표 1에 제시된 바와 같이 국내 점성토의 수평압밀계수에 대한 확률분포는 대수정규분포와 음지수분포를 나타내며, 판정값에 근거하여 볼 때 대수정규분포가 가장 적합한 확률분포임을 보였다(0에 접근할수록 적합성 증가). 따라서 본 연구에서는 확률변수인 수평압밀계수의 확률분포를 대수정규분포로 선정하여 해석하였다.

표 1. 확률분포 함수별 수평압밀계수의 검정결과

확률분포	통계값	판정값(%)	판정결과
정규분포	$m=0.0047, \delta=0.0036$	1.0000	기각
대수정규분포	$m=0.0034, \delta=0.8478$	0.6207	채택
음지수분포	$m=0.0047, \lambda=214.79$	0.8245	채택
감마분포	$\alpha=0.0060, \beta=0.7719$	1.000	기각

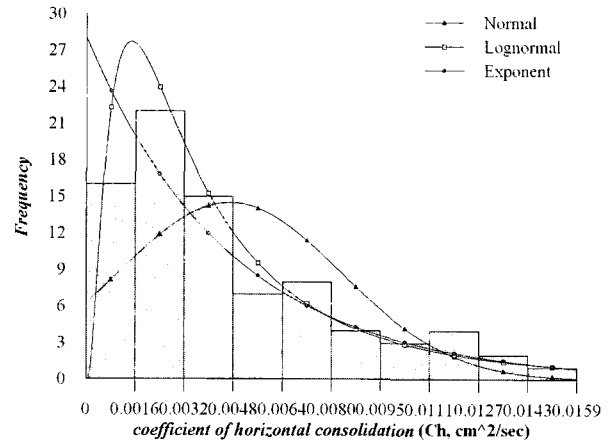


그림 4. 수평압밀계수의 확률분포 특성

2.4 방사형 압밀이론의 확률론적 해석

2.1절의 식 (5)는 확률변수를 1개 또는 그 이상으로 취하여 확률론적 해를 구할 수 있다. 본 연구에서는 민감도 분석 결과와 기존 연구 결과(Zhou et al., 1999)를 고려하여 연직배수공법 적용시 가장 불확실한 파라미터로 c_h 만을 확률변수로 선택하였다. 확률변수로 c_h 만을 고려하였기 때문에 $U(t_s) \leq U_s(t_s)$ 의 확률 $P[U(t_s) \leq U_s(t_s)] = P_s$ 를 결정하기 위해서는 c_h, c_{hp} 값이 요구된다. $U(t)$ 가 c_h 의 단순 증가함수이기 때문에 다음과 같은 관계가 성립한다(Benjamin and Cornell, 1970).

$$P_s = P[U(t_s) \leq U_s(t_s)] = P(c_h \leq c_{hp}) \quad (8)$$

여기서, $U_s(t_s)$ 는 목표 압밀도이고, c_{hp} 는 목표 압밀도에 도달하기 위한 소요 압밀계수, $P(c_h \leq c_{hp})$ 는 c_h 의 확률이 c_{hp} 의 확률보다 작거나 같음을 나타낸다. 대상 확률변수인 수평압밀계수, c_h 가 대수정규분포 특성을 보이므로 식 (8)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_s = P(c_h \leq c_{hp}) = \Phi \left[\frac{\ln(c_{hp} \sqrt{1+v_{ch}^2}/m_{ch})}{\sqrt{\ln(1+v_{ch}^2)}} \right] \quad (9)$$

여기서, $\Phi(\bullet)$ 는 표준정규분포함수이다.

$c_{hp} = \phi_p m_{ch}$ 라 하면, 설계 요소 ϕ_p 는 역 정규분포함수 $\Phi^{-1}(\bullet)$ 를 사용하여 구할 수 있다.

$$\phi_p = \frac{1}{\sqrt{1+v_{ch}^2}} \exp\left[\Phi^{-1}(P_s) \sqrt{\ln(1+v_{ch}^2)}\right] \quad (10)$$

결과적으로 신뢰성 설계를 위한 r_e 의 필요값 r_{req} 는 c_h, ϕ_p, m_{ch} 값을 사용하여 계산할 수 있게 된다.

$$r_{req}^2 F(r_{req}) = - \frac{2t_s \phi_p m_{ch}}{\ln \left[\frac{1-U_s(t_s)}{1-U_v(t_s)} \right]} \quad (11)$$

3. 연직배수공법의 영향인자

1) 교란 영역의 반지름, r_s

PVD 타입시 사용되는 맨드럴로 인하여 주변 지반은 교란된다. 맨드럴에 의한 절단면의 반지름을 r_m 이라 하면, 기존 연구에서는 r_s 가 r_m 의 2.5~3.0배(Rixner et al., 1986), 또는 2.0배라 제시되어 있다(Hansbo, 1987). 일반적으로 r_s 를 산정하기 위한 방법으로는 1) 과잉간극수압 해석, 2) 함수비 분포 특성, 3) 등강도 곡선, 4) 소성변위를 이용하는 방법이 있다.

본 연구에서는 인천 OO지역에서 채취한 불교란 해성 점토를 대상으로 마름모형 맨드럴을 50mm/sec의 속도

로 길이를 변화시키면서 관입시켜 교란영역(스미어존) 시험을 수행하였다. 그 결과에 해당되는 국수의 소성변형거동과 등강도 곡선을 통하여 교란영역의 직경(d_s)은 시료 채취 위치에 따라서 맨드럴 직경(d_m)의 약 1.7~2.3배임을 알 수 있었다(표 2, 그림 5).

2) 불교란 지반과 교란된 지반의 수평방향 투수계수 비, k_h/k'_h

맨드럴 타입으로 인하여 교란된 점성토 지반의 투수계수는 교란되지 않은 지반의 투수계수보다 더 작은 값을 갖는다. 이것은 교란으로 인하여 점성토의 구조가 면모구조에서 분산구조로 변화되기 때문이다. k_h/k'_h 의 비는 실험적인 데이터 값이 없을 경우 대략 2.0을 취한다. 본 연구에서는 교란영역 시험을 수행한 후 채취한 시료에 대한 압밀시험결과부터 투수계수를 획득하였으며, 그 결과 평균 k_h/k'_h 는 1.30으로 나타났다(그림 6).

3) 연직 배수재의 통수능, q_w

q_w 는 배수재가 지반에 매설됨에 따른 통수단면적으로 감소 또는 클로깅(Clogging) 등 여러 가지 요인에 의해 시간이 경과됨에 따라 그 값이 감소되는 경향이 있는데, 이 값은 배수저항 인자, F_r' 을 평가하는데 사용한다. 본 연구에서는 인천 OO지역에서 채취한 해성 점토를

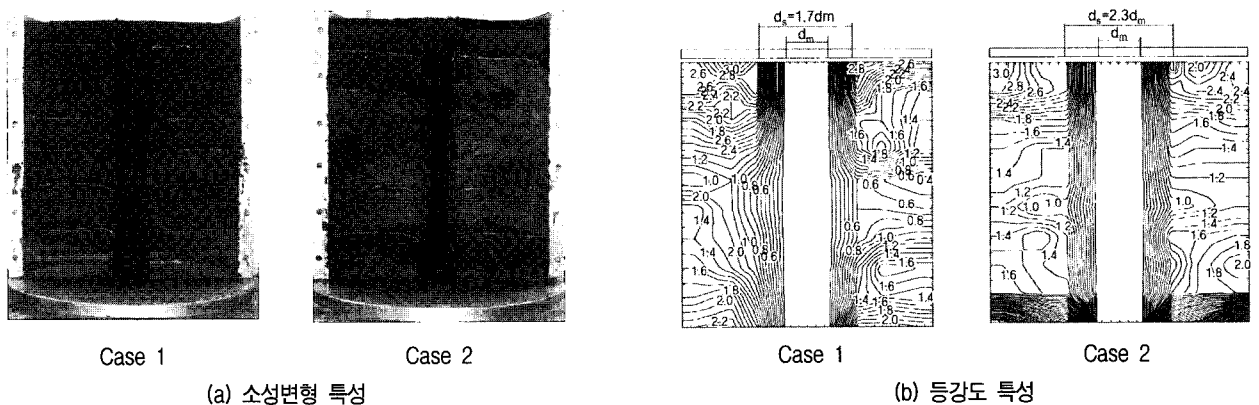


그림 5. 맨드럴 관입에 따른 소성변형과 강도변화 특성

표 2. 교란영역 시험 결과

맨드럴직경(d_m) (cm)	시험조건	교란영역 직경/맨드럴직경(d_s/d_m)		비고
		소성변형	등강도	
5	Case 1	2.4	2.3	모형 관입조건(GL. -0m)
	Case 2	1.8	1.7	모형 관입조건(GL. -15m)

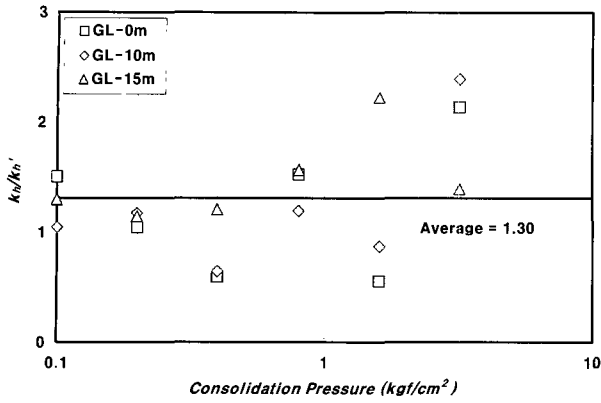


그림 6. 교란영역과 불교란영역의 투수계수비

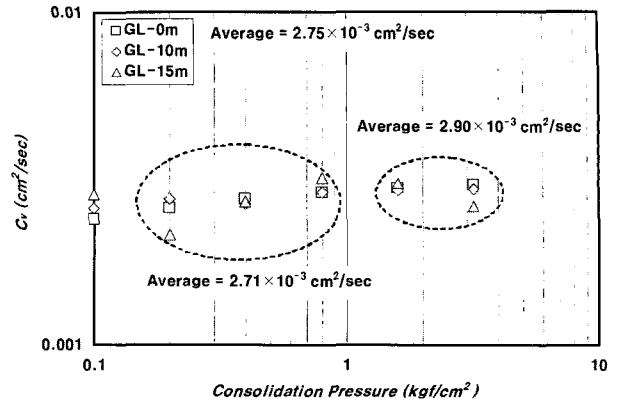


그림 8. 연직압밀계수

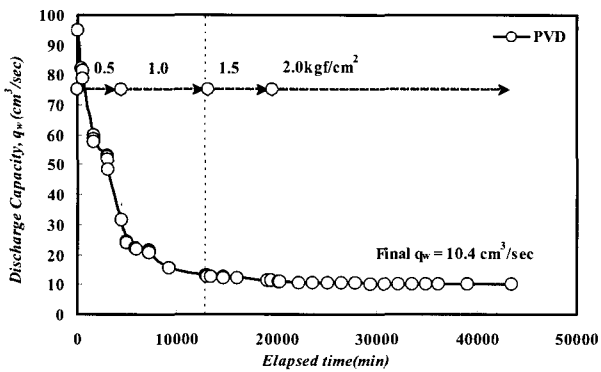


그림 7. 복합통수능 시험 결과

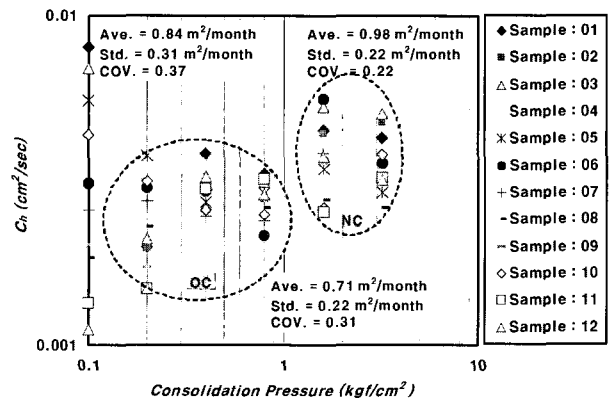


그림 9. 수평압밀계수

대상으로 현재 연약지반 설계시 활용빈도가 매우 높은 복합통수능 시험을 실시하여 획득한 최종 통수능 값, $q_w = 10\text{cm}^3/\text{sec}$ 를 사용하였다(그림 7).

4) 압밀계수

압밀계수는 연직압밀계수, c_v 와 수평압밀계수, c_h 로 구분되며, 일반적으로 연약지반이 층상으로 퇴적되기 때문에 수평압밀계수가 더 큰 값을 보인다. 본 연구에서 적용된 압밀계수는 복합통수능 시험이 완료된 후 시료를 연직 또는 수평으로 채취하여 수행된 표준압밀시험 결과로부터 취득하였다. 그림 8~9에 제시된 바와 같이 연직압밀계수는 $0.73\text{m}^2/\text{month}$ 이고, 수평압밀계수의 경우 전 데이터에 대하여 평균 $0.84\text{m}^2/\text{month}$, 표준편차 $0.31\text{m}^2/\text{month}$, 분산계수 0.37로 나타났다.

결정론적 방법의 경우 연직압밀계수의 대표값은 일반적으로 $P'_0 + \Delta P/2$ 또는 정규압밀영역에서의 평균값으로 적용하는 방법이 주로 이용되고 있다. 수평압밀계수의 경우 연직압밀계수와 동일한 방법을 이용할 수 있다. 그러나 $P'_0 + \Delta P/2$ 법의 경우 단지 하나의 값을 가지

기 때문에 확률론적 해석에 필요한 변동계수를 산정할 수 없다. 민감도 분석 결과 연직압밀계수는 연직배수재 배치간격에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났기 때문에 산정방법에 큰 의미가 없을 것으로 판단된다. 그러나 확률론적 방법에서는 평균값과 변동계수 값을 동시에 결정하여야 하며, 그 값들은 산정방법에 따라 큰 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 과압밀영역, 정규압밀영역, 전 영역에 대하여 평균값과 변동계수를 산정하여 각각에 대하여 연직배수재 배치간격 결정에 사용하여 비교, 분석하고자 하였다.

4. 불확실성을 고려한 연직배수재 배치간격 결정

연직배수공법의 중요 설계조건은 배수재의 설치간격을 결정하는 것이다. 이하에서는 신뢰성 설계를 위한 배치간격 결정 과정을 순서대로 제시하였다.

첫째, 사용될 PVD를 결정하고, 이후 평균 수평압밀계수(m_{ch}), 연직압밀계수(c_v), 투수계수비(k_h/k_h'), 통수능과 수평투수계수 관계(k_h/q_w), 등가경(r_w), 스미어준과 등가경의 관계(r_s/r_w), 배수거리(L), 압밀 소요기간

(t_s), 목표압밀도($U_s(t_s)$) 등을 결정한다. 본 연구에서 사용한 설계 파라미터는 표 3과 같다.

둘째, 수평압밀계수의 변동계수(COV), v_{ch} 와 목표압밀도, $U_s(t_s)$ 에 도달하지 못할 확률, P_s 에 따른 설계 차트를 작성한다(그림 10).

셋째, 설계조건에 부합하는 수평압밀계수의 변동계수(COV), v_{ch} 와 목표압밀도, $U_s(t_s)$ 에 도달하기 위한 확률, $1-P_s$ 를 결정한다. 이후 그림 10으로부터 v_{ch} 와 P_s 에 해당되는 설계 요소, ϕ_p 를 결정한다.

넷째, $U_v(t_s)$, F_s+F_r 및 $n=r_{req}/r_w$ 에 대한

$$\zeta = \left\{ \frac{r_{req}}{r_w} \right\}^2 F(r_{req}) = \frac{2t_s \phi_p m_{ch}}{\ln \left[\frac{1-U_s(t_s)}{1-U_v(t_s)} \right]} \cdot \frac{1}{r_w^2}$$

계산 후 ζ 를 x축으로, n 을 y축으로 하는 설계 차트를 작성한다(그림 11).

다섯째, 설계 조건에 부합하는 F_s+F_r 과 ζ 를 사용하여 그림 11로부터 간격비, n 을 결정하고, $r_{req} = n \cdot r_w$ 를 이용하여 설계 유효반경을 결정한다. 이후 배수재 배치 형태에 따른 설치 간격, S 를 결정한다.

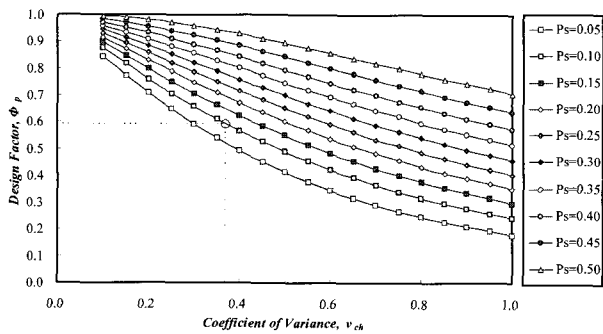


그림 10. 변동계수 및 확률에 따른 설계 요소

이상과 같은 과정을 거쳐 획득한 결과는 표 4와 같다.

위의 표에 제시된 바와 같이 결정론적 방법과 확률론적 방법에 의해 결정된 연직배수재 배치간격간의 차이는 확률변수로 고려한 수평압밀계수의 변동계수에 의존적임을 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 설계 파라미터의 불확실성을 고려한 신뢰성 설계를 위해 표준압밀시험, 방사형 일정변형속도 압밀시험, 로우셀 시험, 복합통수능 시험 그리고 교란영역 시험 결과를 사용하고, 방사형 압밀이론에 대한 민감도 분석과 확률론적 해석을 수행하였다. 그 결과 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 연직배수재 배치간격에 가장 큰 영향을 미치는 인자인 수평압밀계수의 확률분포는 대수정규분포와 음지수분포를 보이며, 국내 연직지반의 경우 대수정규분포가 가장 적합한 것으로 나타났다.

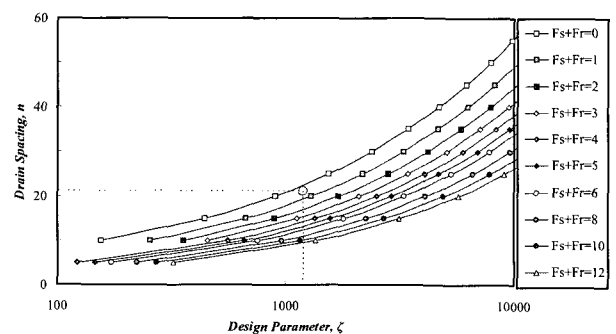


그림 11. 설계 변수 및 F_s+Fr 에 따른 배수재 간격비

표 3. 신뢰성 설계에 사용된 설계 파라미터

m_{ch} ($m^2/month$)	v_{ch} (N.D)	c_v ($m^2/month$)	k_h/k_h' (N.D.)	k_h/q_w ($1/m^2$)	r_w (m)	r_s/r_w (N.D.)	L (m)	t_s (month)	$U_s(t_s)$ (%)
0.84(전체)	0.37(전체)	0.73	1.30	3.5×10^{-5}	0.043	2.0	10	5	90
0.71(OC)	0.31(OC)								
0.98(NC)	0.22(NC)								

표 4. 산정된 연직배수재 배치간격

m_{ch} ($m^2/month$)	v_{ch} (N.D)	확률론적 해석			결정론적 해석		반경비(%)
		유효반경 (m)	배치간격 (삼각형, m)	배치간격 (사각형, m)	유효반경 (m)	확률/결정	
0.84(전체)	0.37(전체)	0.90	1.72	1.60	1.05	85.7	
0.71(OC)	0.31(OC)	0.87	1.66	1.54	0.98	88.8	
0.98(NC)	0.22(NC)	1.08	2.05	1.90	1.12	96.4	

(2) 설계 파라미터의 불확실성을 고려하지 않는 결정론적 방법으로 결정된 연직배수재 배치간격이 신뢰성 설계로부터 결정된 간격보다 넓게 나타남을 보였다. 두 값의 차이는 확률해석시 고려한 목표압밀도에 도달하기 위한 확률과 확률변수로 고려한 수평압밀계수의 변동계수에 의존적임을 보였다.

본 논문은 아직 국내에서는 생소한 신뢰성 설계에 대한 일례를 제시함으로써 향후 연약지반개량공법 설계시 많은 도움을 줄 것으로 사료된다. 그러나 본 논문에서는 확률변수로 수평압밀계수 그리고 확률분포는 대수정규분포를 채택하였으므로 향후 이용시 채택된 확률변수와 확률분포에 따라 설계 결과가 다소 차이를 보일 수 있음을 주의해야 할 것이다. 아울러 신뢰성 있는 현장 시공 데이터에 대한 해석을 통해 본 설계법에 대한 파괴확률을 정당화 시킬 수 있는 연구가 시급히 요구된다.

감사의 글

본 논문은 2006년도 충주대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행되었는바 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 강기민, 김지용, 김홍석, 김래현 (2006), 확률론적 접근법을 이용한 연직배수공법 설계의 신뢰성 분석, *한국지반공학회지*, 제22권 8호, pp.15-24.
2. 김병일, 사상호, 김방식, 김수삼 (2006), 연약지반의 불확실성을 고려한 연직배수공법의 신뢰성 설계, *한국지반공학회 불확실발표회*, pp.1148-1154.
3. Barron, R. A. (1948), "Consolidation of fine-grained soils by drain wells", *Trans. ASCE*, 2346, pp.221-228.
4. Benjamin, J. R. and Cornell, C. A. (1970), "*Probability, statistics, and decision for civil engineers*", McGraw-Hill, New York.
5. Carrillo, N. (1942), "Simple two- and three-dimensional cases in the theory of consolidation of soil", *J. Mathematics Physicals*, 21(1), 1-5.
6. Cristian, J. T., Ladd, C. C., and Baecher, G. B. (1994), "Reliability applied to slope stability analysis", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.120, No.12, pp.2180-2207.
7. Hansbo, S. (1981), "Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains", *Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Stockholm, Sweden, Vol.3, paper 12/22, pp.677-682.
8. Hong, H.P. and Shang, J.Q. (1998), "Probabilistic analysis of consolidation with prefabricated vertical drains for soil improvement", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.35, pp.666-677.
9. Lacasse, S. and Nadin, F. (1996), "Uncertainties in characterizing soil parameters, Uncertainties in the geologic environment", *Madison, ASCE*, pp.49-75.
10. Lumb (1966), "The variability of natural soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.3, pp.74-97.
11. Rixner, J. J., Kremer, S. R., and Smith, A. D. (1986), "Prefabricated vertical drains", Vol. II : Summary of Research Effort, FHWA, *Research Report No. FHWA/RD-86/169*, Washington.
12. Terzaghi, K. (1948), *Theoretical soil mechanics*, Wiley, New York.
13. Zhou, W., Hong and J. Q. Shang (1999), "Probabilistic design method of prefabricated vertical drains for soil improvement", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.125, No.8, pp.659-664.

(접수일자 2007. 1. 9, 심사완료일 2007. 4. 17)