

연약지반의 불확실성을 고려한 연직배수공법의 신뢰성 설계 Reliability-Based Design of Vertical Drain Method Considering Uncertainties in Geotechnical Property

김병일¹⁾, Byung-Il Kim, 사상호²⁾, Sang-Ho Sah, 김방식³⁾, Bang-Sig Kim, 김수삼⁴⁾, Soo-Sam Kim

¹⁾ (주)이제이텍 기술연구소 연구원, Researcher, Research & Development Center, EJtech

²⁾ (주)이제이텍 토목설계부 상무, Managing Director, Geotechnical Eng. & Design Dept., EJtech

³⁾ 충주대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Chung Ju University

⁴⁾ 한양대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Han Yang University

Synopsis : 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 probabilistic and deterministic solutions of radial consolidation theory are presented. It compared to the result of reliability-based design and that of deterministic design using the tested and estimated parameters. The results indicated that the drain spacing is larger the deterministic method than the probabilistic method because the former is not considered the uncertainties in the properties of soil. The divergence of 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).

Key words : Vertical drain method, Probabilistic solution, Reliability-based design

1. 서 론

양질의 토사를 사용할 수 없는 지역에서는 해저면으로부터 준설된 해성점토를 사용하여 매립이 이루어진다. 그러나 투기장에 고함수비 상태로 투기된 준설토는 침강, 자중압밀이 완료될지라도 상부 구조물을 축조하기에는 불안정하다. 따라서 이와 같은 연약지반을 개량하기 위해서는 압밀과정을 촉진시킬 수 있는 지반개량공법의 도입이 필요하다. 국내의 경우 일반적으로 연직배수재(이하 PVD)와 상재하중 재하공법을 병행하여 연약지반을 개량하는 사례가 많다.

연약지반개량을 위한 공법 중 PVD와 상재하중 재하공법의 이론적인 개념이 Barron(1948)과 Hansbo(1981)에 의해 제시되어 설계에 적용되고 있다. 그러나 토질 및 PVD 관련 파라미터에 포함된 불확실성이 고려되지 않아 공사 기간내에 소요 압밀도에 도달하지 못하는 사례가 발생하기도 한다.

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 일부분만을 대상으로 하여 얻은 시험 결과를 가지고 전체 지반의 성질을 추정해야 하는 문제도 있다. 또한 얻고자 하는 지반 특성이 재료자체의 고유한 특성(Inherent property)이 아니고 재료에 작용하는 현재의 응력상태, 과거의 응력이력, 시험장비 특성 및 시험방법 등에 영향을 받는 경우가 대부분이다.

이상에서 제시한 바와 같이 지반 및 PVD 관련 파라미터는 필연적으로 불확실성이 내재되어 있어 궁극적으로는 설계와 시공의 불일치가 발생할 수 있는바 신뢰성 있는 연약지반개량을 위한 설계시 불확실성

을 고려한 설계가 이루어 져야 한다. 그러나 국내의 설계 관행에서는 확률 및 통계이론이 어려운 학문 일 것이라는 막연한 불안감 때문에 외국과는 달리 신뢰성 설계가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 이 에 본 연구에서는 확률이론에 기반을 둔 신뢰성 설계 사례를 제시하여 향후 연직배수공법에 관한 설계 에 도움을 주고자 하였다.

2. 연직배수 압밀이론의 결정론적 및 확률론적 해석

연약지반개량을 위해 이용되는 연직배수공법의 경우 방사방향의 압밀과 연직방향의 압밀이 복합적으로 발생한다. 방사방향의 압밀은 연직방향의 압밀로 인하여 수평(방사)방향의 배수가 발생하는 조건을 말하는 것이다. 그림 1은 일반적인 연직배수공법의 해석 및 설계에 필요한 교란영역에 관한 모식도를 나타 낸 것이다(그림 1a).

본 연구에서는 압밀이론을 해석함에 있어 계산상의 편의를 위해 연직 변형은 등변형률 조건으로 간주하였으며(Barron, 1948), 연직배수공법 중 PVD를 사용하는 경우를 고려하고자 배수재 통수능을 고려하고, Darcy 법칙이 배수재를 따라 흐르는 흐름에 적용가능하고, 연약지반은 균질하다고 가정하였다. 결과적으로 임의 깊이에서의 수평방향의 평균 압밀도 $U_h(t)$ 는 다음과 같다(Hansbo 1979, 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 통수능, $n = r_e/r_w$; $\xi = r_s/r_w$ 이다.

연약지반에서 연직배수가 발생할 때의 평균 압밀도 계산은 Rixner et al.(1986)이 제안한 전체 배수재 길이에 대한 평균 배수저항 요소인 F'_r 을 사용한다(Hong and Shang, 1998).

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

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, 1943).

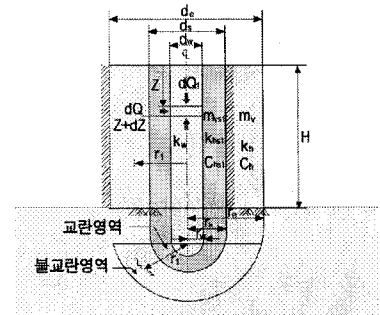


그림 1. 교란영역 모식도

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

여기서, $A_i = \pi(2i + 1)$, $i = \text{정수}$.

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.

위의 식 (5)는 확률변수를 1개 또는 그 이상으로 취하여 확률론적 해를 구할 수 있다. 본 연구에서는 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, $P(c_h \leq c_{hp})$ 는 c_h 의 확률이 c_{hp} 의 확률보다 작거나 같음을 나타낸다. c_h 를 대수정규분포(lognormal distribution)로 가정하면(Zhou et al., 1999), 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, 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_{ep} 는 c_h , ϕ_p , m_{ch} 값을 사용하여 계산할 수 있게 된다.

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

3. PVD공법의 주요 설계 파라미터와 불확실성

1) 교란 영역의 반지름, r_s

PVD 타입시 사용되는 맨드릴로 인하여 주변 지반은 교란된다. 맨드릴에 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).

본 연구에서는 OO지역에서 채취한 불교란 해성 점토를 대상으로 마름모형 맨드릴을 50mm/sec의 속도로 길이를 변화시키면서 관입시켜 교란영역(스미어존) 시험을 수행하였다. 그 결과에 해당되는 국수의 소성변형거동과 등강도 곡선을 통하여 교란영역의 직경(d_s)은 시료 채취 위치에 따라서 맨드릴 직경(d_m)의 약 1.7~2.3배임을 알 수 있었다(표 1, 그림 2).

표 1. 교란영역 시험 결과

d_m (cm)	시험조건	d_s/d_m	
		소성변형	등강도
5	Case 1	2.4	2.3
	Case 2	1.8	1.7

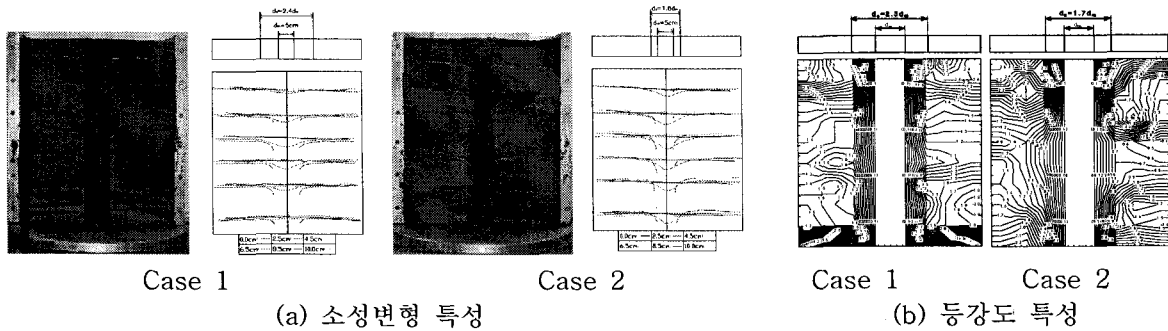


그림 2. 맨드릴 관입에 따른 소성변형과 강도변화 특성

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

맨드릴 타입으로 인하여 교란된 점성토 지반의 투수계수는 교란되지 않았거나 원위치에서 보다 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 압밀시험결과로부터 투수계수를 획득하였으며, 그 결과 평균 k_h/k'_h 는 1.30으로 나타났다(그림 3).

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 OO지역에서 채취한 불교란 해성 점토를 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 4).

4) 압밀계수

압밀계수는 연직압밀계수, c_v 와 수평압밀계수, c_h 로 구분되며, 일반적으로 연약지반이 층상으로 퇴적되기 때문에 수평압밀계수가 더 큰 값을 보인다. 기존 문헌(Hong and Shang, 1998; Zhou et al., 1999)

에 제시된 바에 따르면 연직압밀계수 보다는 수평압밀계수가 압밀도에 지배적인 영향을 미치는 것으로 제시되어 있다. 따라서 본 연구에서는 연직압밀계수를 상수로, 수평압밀계수를 확률변수로 처리하였고, 복합통수능 시험이 완료된 후 시료를 연직 또는 수평으로 채취하여 수행된 표준압밀시험 결과로부터 결정하였다. 그림 5~6에 제시된 바와 같이 연직압밀계수는 $0.73\text{m}^2/\text{month}$ 이고, 수평압밀계수의 경우 평균 $0.84\text{m}^2/\text{month}$, 표준편차 $0.31\text{m}^2/\text{month}$, 분산계수 0.37로 나타났다.

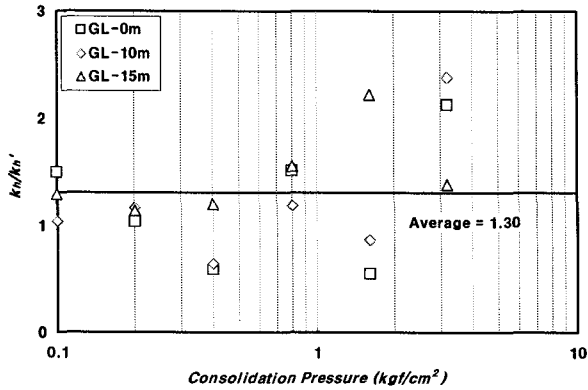


그림 3. 교란영역과 불교란영역의 투수계수비

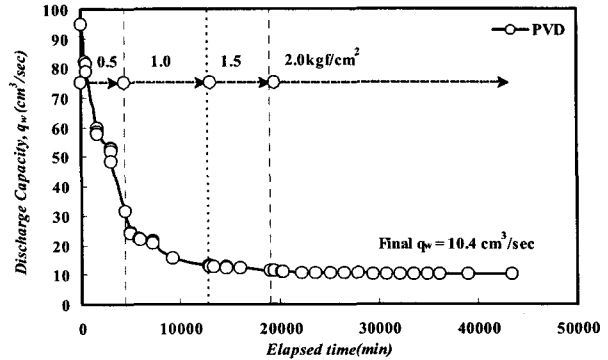


그림 4. 복합통수능 시험 결과

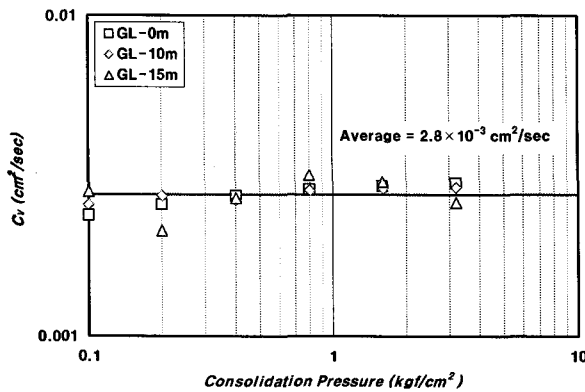


그림 5. 연직압밀계수

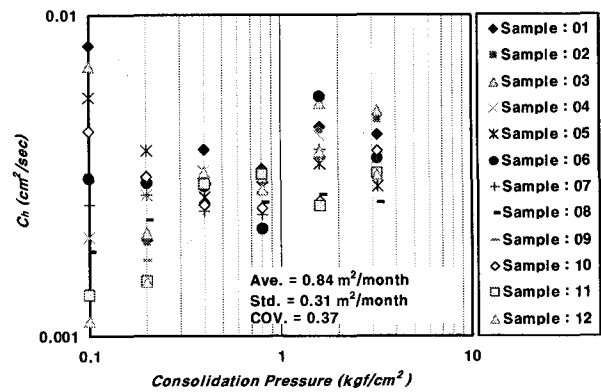


그림 6. 수평압밀계수

4. 불확실성을 고려한 신뢰성 설계

연직배수공법의 중요 설계조건은 배수재의 설치간격을 결정하는 것이다. 이하에서는 일반적인 설계과정을 순서대로 설명하였다.

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), 스미어존과 등가경의 관계(r_s/r_w), 배수거리(L), 압밀 소요기간(t_s), 목표압밀도($U_s(t_s)$) 등을 결정한다. 본 연구에서 사용한 설계 파라미터는 아래의 표와 같다.

표 2. 신뢰성 설계에 사용된 설계 파라미터

m_{ch} (m^2/month)	c_v (m^2/month)	k_h/k_h' (N.D.)	k_h/q_w ($1/\text{m}^2$)	r_w (m)	r_s/r_w (N.D.)	L (m)	t_s (month)	$U_s(t_s)$ (%)
0.84	0.73	1.30	3.5×10^{-5}	0.043	2.0	10	5	90

둘째, 수평압밀계수의 변동계수(COV), v_{ch} 와 목표압밀도, $U_s(t_s)$ 에 도달하기 위한 확률, P_s 에 따른 설계 차트를 작성한다(그림 7).

셋째, 설계조건에 부합하는 수평압밀계수의 변동계수(COV), v_{ch} 와 목표압밀도, $U_s(t_s)$ 에 도달하기 위한 확률, P_s 를 결정한다. 이후 그림 7로부터 v_{ch} 와 P_s 에 해당되는 설계 요소, ϕ_p 결정한다.

넷째, $U_v(t_s)$, $F_s + F_r$ 및 $n = r_{ep}/r_w$ 에 대한 $\zeta = \left\{ \frac{r_{ep}}{r_w} \right\}^2 F(r_{ep}) = \frac{2t_s \phi_p m_{ch}}{\ln \left[\frac{1 - U_s(t_s)}{1 - U_v(t_s)} \right]} \cdot \frac{1}{r_w^2}$

계산 후 ζ 를 x축으로, n 을 y축으로 하는 설계 차트를 작성한다(그림 8).

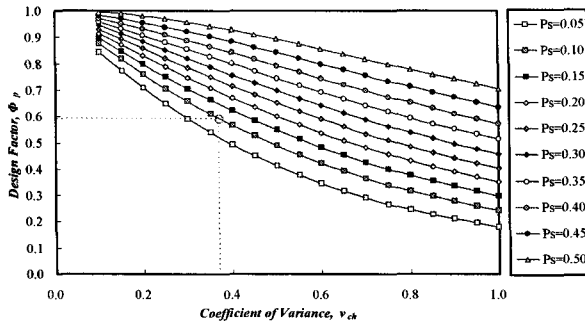


그림 7. 변동계수 및 확률에 따른 설계 요소

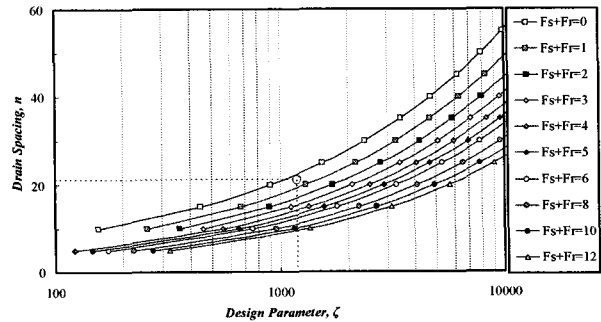


그림 8. 설계 변수 및 $F_s + F_r$ 에 따른 배수재 간격비

다섯째, 그림 8로부터 설계 조건에 부합하는 $F_s + F_r$ 과 ζ 를 사용하여 간격비, n 을 결정하고, $r_{ep} = n \cdot r_w$ 를 이용하여 설계 유효반경을 결정한다. 이후 배수재 타입 형태에 따른 설치 간격, S 를 결정한다.

이상과 같은 신뢰성 설계 과정을 거쳐 유효반경, $r_{ep} = 0.90m$, 삼각형 배치시 설치간격, $S_{tri.} = 1.72m$, 사각형 배치시 설치간격, $S_{rect.} = 1.60m$ 을 얻을 수 있다. 이 설계값은 결정론적 방법(식 7)에 의한 유효반경 = $1.05m$, $S_{tri.} = 2.00m$, $S_{rect.} = 1.86m$ 보다 작은 값이며, 두 값간의 차이는 확률해석시 고려한 확률과 확률변수로 고려한 수평압밀계수의 변동계수에 의존적임을 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 지반의 불확실성 및 설계 파라미터의 불확실성을 고려한 신뢰성 설계를 위해 복합통수능 시험 결과와 교란영역 시험 결과를 사용하고, 연직배수 압밀이론에 대한 확률론적 해석을 수행하였다. 그 결과 설계 파라미터의 불확실성을 고려하지 않는 결정론적 방법으로 결정된 PVD 설치간격이 신뢰성 설계로부터 결정된 간격보다 넓게 나타남을 보였다. 두 값의 차이는 확률해석시 고려한 목표압밀도에 도달하기 위한 확률과 확률변수로 고려한 수평압밀계수의 변동계수에 의존적임을 보였다. 마지막으로 본 논문은 아직 국내에서는 생소한 신뢰성 설계에 대한 일례를 제시함으로써 향후 연약지반개량공법 설계시 많은 도움을 줄 것으로 사료된다.

참고문헌

이송, 최우진, 이장덕(2004), PBD 타설간격결정을 위한 확률론적 해석방법, 대한토목학회 논문집, 제24권 제2C호, pp. 81-87.

- 윤길림, 이규환, 채광석(2004), 확률 및 신뢰성 개념을 도입한 지반설계 사례연구, 한국지반공학회 지반 조사위원회 학술논문집, pp. 73-107.
- Freeze, R. A.(1977), Probabilistic One-Dimensional Consolidation, Journal of the Geotechnical Engineering, Vol. 103, No. 7, pp. 725-742.
- Chang, C. S.(1985), Uncertainty of One-Dimensional Consolidation Analysis, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 111, No. 12, pp. 1411-1424.
- 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.
- 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.
- Barron, R. A.(1948), Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells, Trans, ASCE, 2346, pp. 221-228.
- 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.
- 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.