

연직배수재의 소요통수능 평가

Evaluation of Required Discharge Capacity for Prefabricated Vertical Drains

김 상 규*¹ Kim, Sang-Kyu

김 현 태*² Kim, Hyun-Tae

공 길 용*³ Kong, Kil-Yong

Abstract

The paper written by Bergado et al.(1996) gives a research summary conducted by many researchers about the required discharge capacity of prefabricated vertical drains. According to their paper, the criteria recommended for the required capacity ranges varied from 0.32 to 50cc/s depending on authors. The required discharge capacity is re-examined in this paper based on new development of consolidation analysis. The analysis takes into account the variations of discharge capacity with time, and coefficient of consolidation. Compression index, and embedded length of the drain, from which an simple equation that is able to determine the required discharge capacity can be drawn. It is concluded that, when the inherent discharge capacity of vertical drains is over the value calculated from the equation, the drains can be used without any consideration of discharge capacity on the consolidation analysis.

요 지

Bergado에 의해 비교 분석된 많은 연구자들의 배수재의 소요통수능에 대한 제안값을 보면 0.32 ~ 50cc/s로 그 차이가 너무 크기 때문에 실무에 적용하기가 어렵다. 본 연구에서는 배수재의 통수능변화를 고려할 수 있는 압밀해석방법을 개발하고, 흙의 압밀계수, 압축지수, 배수재 타설심도 및 타설후 시간경과에 따른 배수재의 통수능 감소등의 현장여건을 고려한 압밀해석을 통하여 압밀지연을 일으키지 않는 배수재의 소요통수능에 대한 기준을 제시하였다.

압밀해석결과 어느 값 이상의 통수능에서는 압밀지연이 없으므로 이 값 이상의 통수능을 갖는 배수재를 선택하는 것이 중요하며, 압밀지연시간 5%이내인 배수재의 소요통수능은 압밀계수(c_v), 배수재의 길이(L) 및 압축지수(C_c)와 비례관계로서 안전율 1.5를 고려하여 $q_{wa} = 8 \times (c_v \times L \times C_c)$ (cc/s) 이상이면 되는 상관식을 얻었다. 이 값 이상의 배수재를 선택하는 경우는 연직배수공법의 압밀해석에서 배수재의 통수능을 고려하지 않아도 된다는 결론을 얻었다.

Keywords : Vertical drain, Discharge capacity, Prefabricated vertical drains

1. 서론

인공배수재를 타설하여 연약지반의 압밀을 촉진하는 밴드드레인공법에서 연직배수재의 통수능은 지반의 압밀 속도에 영향을 주지 않도록 충분히 커야한다.

수평배수압밀의 기본이론은 Barron(1948)에 의해 제안되었다. 그 후 Yoshikuni 와 Naganodo(1974), Hansbo (1979, 1981), Onoue(1988) 등에 의해 배수재 타설에 따른 흙의 교란과 배수재의 통수능력을 고려한 해석이 개발되었다.

*1 정회원, 동부산대 학장
*2 정회원, 농업기반공사 농어촌연구원 책임연구원
*3 정회원, 농업기반공사 농어촌연구원 주임연구원

Hansbo(1997)는 최근에 생산되는 배수재의 통수능력이 충분하기 때문에 설계를 위한 압밀해석에서 웰저항의 영향을 고려하지 않는다고 하였다. 이것은 배수재의 통수능이 충분히 커서 웰저항에 의한 압밀지연이 발생되지 않는 경우에 가능하다.

그러나 많은 연구자들이 제안한 배수재의 소요통수능 값을 보면 그 값의 차이가 너무 크기 때문에 실무에 적용하기가 어렵다. 그러므로 통수능에 주요하게 영향을 미치는 요소를 고려하여 소요통수능을 쉽게 결정할 수 있는 기준의 정립이 필요하다.

또한 현장에 타설된 배수재의 통수능은 압밀시간이 경과하면서 감소하므로, 배수재의 성능판정시, 감소된 값을 기준으로 하여야 하는지, 아니면 초기에 값을 기준으로 하여야 하는지 분명하지 않다.

본 연구에서는 압밀진행동안 배수재의 통수능감소를 고려할 수 있는 압밀해석방법을 개발하고, 본 제안 해석방법으로 각 영향요소들을 변화시켜가면서 압밀해석을 실시하여, 배수재의 소요통수능에 대한 기준을 제시하였다.

2. 연직배수재의 통수능을 고려한 압밀해석방법

2.1 통수능변화를 고려한 압밀해석의 필요성

Bergado(1996)에 의해 비교 분석된 배수재의 소요통수능에 대한 많은 연구자들의 제안자료를 보면 표 1과 같이 0.32~50cc/s로 그 값의 차이가 크다. 이 차이는 각 제안값의 현장조건, 즉 흙의 압밀계수, 배수재의 타설심도, 압축지수등이 각각 다르기 때문으로 이들 영향요소를 고려하여 배수재의 소요통수능을 결정할 수 있는 기준의 정립이 필요하다.

표 1. 소요통수능에 대한 제안값 (by Bergado et al, 1996)

Source	q _w (cc/s)	Lateral stress(kpa)
Jamiolkowski et al.(1983)	0.32 ~ 0.48	50 ~ 300
den Hoedt (1981)	3	50 ~ 300
Kremer et al. (1982)	8	100
Kremer (1983)	25	15
Hansbo (1987)	1.6 ~ 3.2	Not given
Rixner et al. (1986)	3.2	Not given
Van Zanten (1986)	25 ~ 50	150 ~ 350
Holtz et al. (1989)	3.2 ~ 4.8	50 ~ 300
Lawrence and Koerner (1988)	4.8	Not given
Koda et al. (1984)	3.2	50
De Jager and Oostveen (1990)	10 ~ 50	150 ~ 300
Bergado et al (1996)	15.8	max. in site

또한 Holtz(1991), Ali(1991), Broms(1994) 등의 연구결과를 보면, 흙이 압밀되면서 배수재의 연직방향변형과 필터의 변형 등에 의해 배수재의 통수능은 시간이 경과하면서 감소한다. 이 감소가 압밀지연에 얼마나 큰 영향을 미치는지, 그리고 배수재의 품질 판정 시, 소요통수능을 초기 값과 감소후의 값 중 어느 값을 기준으로 하는 것이 타당한지 분석할 필요가 있다.

Yoshikuni 와 Naganodo(1974), Hansbo(1979, 1981), Onoue(1988) 등의 압밀해석은 압축지수, 상재증가하중의 크기, 단계성토 등의 현장여건을 고려할 수 없다. 특히 배수재의 통수능이 압밀진행동안 감소되는 것을 고려하지 못하므로, 배수재의 통수능 감소가 압밀지연에 미치는 영향 정도를 기존 해석방법으로는 분석할 수 없다.

이를 분석하기 위하여 본 연구에서는 압밀진행동안 배수재의 통수능감소를 고려할 수 있는 압밀해석방법을 개발하고 Hansbo(1979, 1981) 및 Onoue(1988)해석과 비교 분석을 통하여 해석방법의 타당성을 검증하였다. 또한 이 해석방법으로 압축지수, 상재증가하중의 크기, 배수재 타설심도, 통수능감소 등의 현장여건을 고려한 배수재의 소요통수능을 결정하였다.

2.2 해석방법전개

연직배수공법에서 흙속의 과잉수의 흐름은 그림1과 같이 배수재를 중심으로 반경방향으로 형성되는 동수경사에 의해 배수재로 흘러들어오는 수평(inner radial)방향흐름과정과 배수재를 통하여 수직방향으로 배제되는 과정으로 나누어 생각할 수 있다.

2.2.1 수평방향흐름

수평방향흐름에 의한 압밀해석방법을 유도하기 위하여 수평방향의 흐름만을 고려하여 그림 1.a)와 같이 유한요소계로 나누어 생각해 보자.

수평방향 배수에서 반지름 r_i 원주를 통과하는 투수량은 다음 식과 같다.

$$\Delta q_i = -\frac{k_{hi}}{\gamma_w} \frac{\Delta u}{\Delta r} 2\pi r_i L_i \Delta t \quad (1)$$

여기서, 투수계수 k_h 는 김(2000)이 제안한 다음 식을 이용하였다.

$$k_h = \frac{0.434 c_c c_v}{\gamma_w (1 + e_o) \sigma_f'} \left(\frac{\sigma_v'}{\sigma_f'} \right)^x \quad (2)$$

i 요소의 체적변형률 $\epsilon_{v(r=i)}$ 은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\epsilon_{v(r=i)} = \frac{q_i - q_{(i+1)}}{A_{i(t=0)} \cdot L_{i0}} \quad (3)$$

여기서 q_i 는 i 요소를 통과하는 유량이고, $q_{(i+1)}$ 은 $i+1$ 요소를 통과하는 유량이다.

i 요소의 간극비변화 $\Delta e_{(r=i)}$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있으며

$$\Delta e_{(r=i)} = \epsilon_{v(r=i)}(1 + e_o) \quad (4)$$

여기서

$$\Delta e = \frac{C_c}{1 + e_o} \cdot \log \frac{\sigma_{v_{j+1}}'}{\sigma_{v_j}'}$$

$t=j+1$ 에서 i 요소의 유효응력 $\sigma_{v_{j+1}}'$ 은 다음식으로 구하고

$$\sigma_{v_{j+1}}' = 10^{\left[\frac{\Delta e(1 + e_o)}{C_c} + \log \sigma_{v_j}' \right]} \quad (5)$$

Δt 동안의 과잉간극수압 소산량 $\Delta u_{i(t=j-k)}$ 은 다음식으로 구할 수 있다.

$$\Delta u_{i(t=j-k)} = \sigma_{v_{j+1}}' - \sigma_{v_{j-k}}' \quad (6)$$

이 관계로부터 각 요소의 Δt 동안의 과잉간극수압소산량 Δu_i 을 구할 수 있으며, 시간 $t=j+1$ 일때의 과잉간극수압 분포도를 얻을 수 있다.

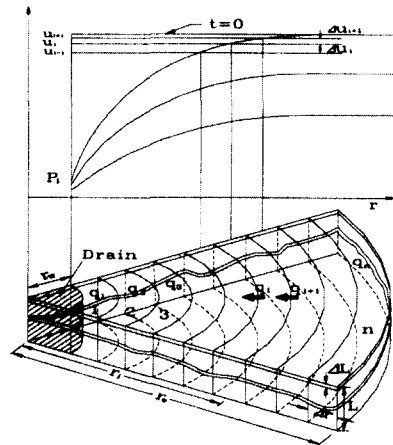
시간 $t=j+1$ 일때의 과잉간극수압분포를 알면 이때의 동수경사로부터 다음 단계의 Δt 동안의 물의 흐름을 계산하여 간극비변화량 Δe 와 과잉간극수압 소산량 Δu_i 을 다시 계산하는 과정을 반복하면 압밀진행과정을 구할 수 있다.

이과정에서 Δt 동안에 배수재로 흘러들어가는 물의 량을 알 수 있으며 이물을 배수재가 배수시키기 위하여 필요한 배수재내에 수압이 존재하고 이 수압만큼 흠으로부터 배수재로 흘러들어오는 물의 량이 적어지게 된다. 그러므로 배수재의 통수능이 적으면 배수재내의 수압이 그만큼 크게되어 압밀지연이 발생된다.

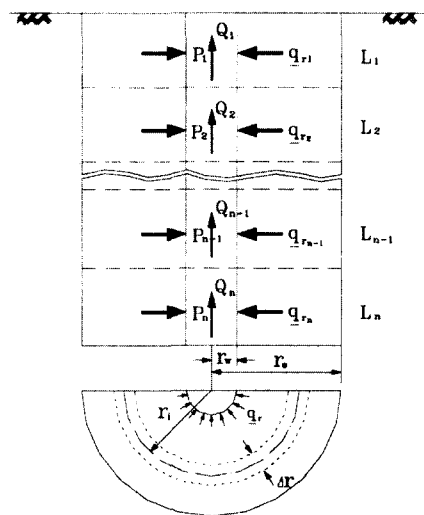
2.2.2 배수재내 수직방향 물의 흐름해석

일면배수조건인 연직배수재내의 물의 흐름은 그림 1.b)와 같이 직경 d_e 의 원통형흠에서 배수재로 흘러들어오는 물이 상부배수층으로 흐르므로 배수재를 흐르는 물의 량은 하층부는 적고 상층부가 가장 크다.

그림에서 배수재내 i 층에서 흐르는 물의 량 Q_i 은 배수재 주위 흠으로부터 압밀배수되는 량 q_{ri} 의 합으로서 이를 식



a) 수평방향배수압밀 모형도



b) 연직방향배수 모형도

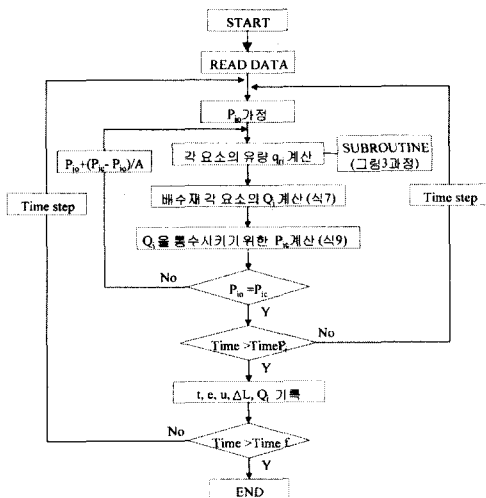
그림 1. 배수재의 통수능을 고려한 압밀해석 모형도

으로 나타내면

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= \frac{q_{r1}}{2} + q_{r2} + \dots + q_{rn} & (7) \\
 Q_2 &= \frac{q_{r2}}{2} + q_{r3} + \dots + q_{rn} \\
 &\vdots \\
 Q_{n-1} &= \frac{q_{r(n-1)}}{2} + q_{rn} \\
 Q_n &= \frac{q_{rn}}{2}
 \end{aligned}$$

배수재내에 물의 흐름에 대하여 Darcy의 법칙을 적용한 배수재의 통수량은 $Q = kiA = k \frac{\Delta h}{L} A$ 이다. 여기서 배수재의 소요통수능 $q_w = kA$ 을 대입하면 $Q = q_w \frac{\Delta h}{L}$ 이므로 각층의 소요배수량을 통수시키기 위하여 요구되는 손실수두 Δh_i 를 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \Delta h_1 &= \frac{Q_1}{q_{w1}} \cdot L_1 & (8) \\
 \Delta h_2 &= \frac{Q_2}{q_{w2}} \cdot L_2 \\
 &\vdots \\
 \Delta h_{n-1} &= \frac{Q_{n-1}}{q_{wn}} \cdot L_{n-1} \\
 \Delta h_n &= \frac{Q_n}{q_{wn}} \cdot L_n
 \end{aligned}$$



A : 보간계수
 time P_i : 계산결과를 기록하고 싶은 시간
 time f : 계산을 종료하고 싶은 시간
 그림 2. 통수능을 고려한 연직배수공법의 압밀해석 프로그램의 흐름도

여기서 q_{wi} : 배수재 i층 위치의 통수능
 L_i : 배수재 i층의 길이
 배수재내 각층 중앙의 정수압을 제외한 과잉수압 p_i 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 p_1 &= \frac{\Delta h_1}{2} \gamma_w & (9) \\
 p_2 &= (\Delta h_1 + \frac{\Delta h_2}{2}) \gamma_w \\
 p_3 &= (\Delta h_1 + \Delta h_2 + \frac{\Delta h_3}{2}) \gamma_w \\
 &\vdots \\
 p_n &= (\Delta h_1 + \Delta h_2 + \dots + \frac{\Delta h_n}{2}) \gamma_w
 \end{aligned}$$

각 층의 Q_i 를 통과시키기 위하여는 배수재내에 수압 p_i 가 필요하게 된다. 즉 통수능이 충분히 커서 웰저항이 없다면 $p_i = 0$ 이 되어 흙의 압밀속도에 영향을 미치지 않겠지만 통수능이 적어서 p_i 가 크다면 흙속에 형성되는 수두경사가 p_i 값만큼 감소하여 압밀이 지연되게 될 것이다.

배수재내에 수압이 p_i 일 때 흙속에 형성되는 수두경사에 의해 흐르는 물의 량을 q_n 라고 하면 배수재가 흘러보내야 하는 통수량 Q_i 는 식(7)과 같다.

여기서 p_i 가 크면 q_n 는 감소하고 Q_i 는 증가하게 된다. 즉 Q_i 와 q_n 가 평형을 유지하는 p_i 조건으로 흙과 배수재내에서 물이 흐르는 것이므로, 압밀시작부터 Δt 시간 간격으로 임의의 시간에 Δt 동안 Q_i 와 q_n 가 평형을 유지하는 p_i 을 시산 방법으로 구하고 배수재내에 수두 p_i 가 있는 조건의 수평배

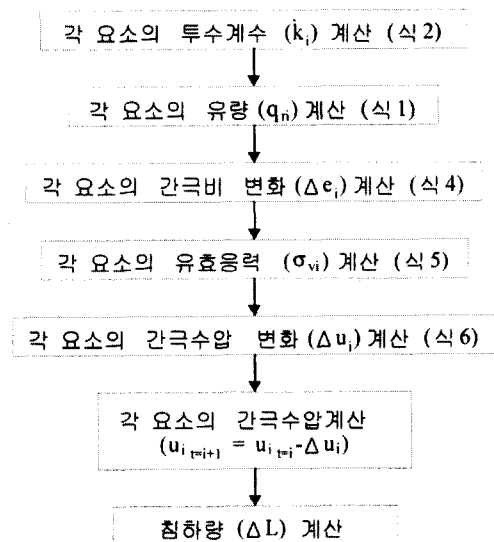


그림 3. 연직배수공법의 수평배수압밀해석 프로그램의 흐름도(그림 2의 subroutine)

수압밀해석을 그림 2의 흐름도와 같이 수행한다.

그림 3의 흐름도는 수평방향의 압밀배수과정을 해석하는 과정이고 그림 2의 흐름도는 그림 3으로 계산된 배수재로 흘러들어오는 수량과 배수재를 통하여 연직방향으로 흐르는 수량이 평형을 유지하는 배수재내의 간극수압을 구하고 Δt 동안의 배수량과 압밀침하량을 구하는 과정이다. 그림 3과 2의 계산과정을 반복하여 압밀이 완료될 때까지 계산하면서 기록하고 쉬운 임의의 시간에 각 위치의 간극수압, 침하량, 간극비, 압밀도등을 기록하여 압밀과정을 그림으로 나타낼 수 있도록 구성하였다. 각 과정의 계산에 적용되는 수식은 그림에 각 과정별로 명기한 식과 같다.

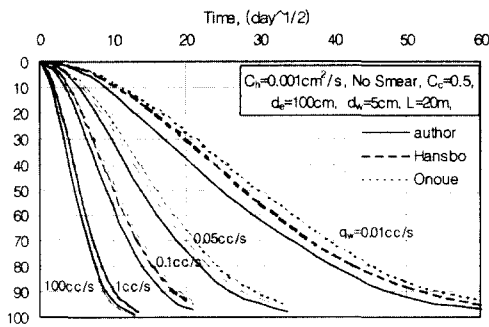
표 2. 압밀해석조건

구 분	토질정수
흙의 압밀계수, c_v	0.001 cm ² /s
흙의 압밀계수, C_c	0.5
유효환산직경, d_e	100 cm
배수재의 유효환산직경, d_w	5 cm
배수재 타설심도, L	20 m 일면배수조건

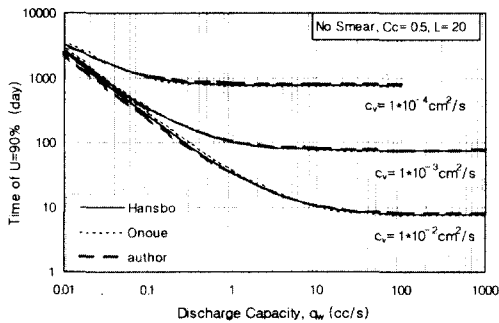
2.3 기존 해석방법과의 비교검증

본 연구에서 제안한 해석방법을 Hansbo해 및 Onoue해로 해석할 수 있는 표 2와 같은 동일한 조건에 대하여, 배수재의 통수능이 0.01, 0.05, 0.1, 1, 100cc/s로 각각 압밀진행동안 일정한 값을 갖는 조건으로 통수능을 고려한 압밀해석을 실시한 결과는 그림 4.a)와 같이 어느 정도 이상의 큰 통수능에서는 3가지 해석결과가 잘 일치한다. 그리고 압밀지연이 발생하는 적은 통수능 값에서도 시간-압밀도 곡선에 약간의 차이는 있지만 유사한 결과를 보이고 있다.

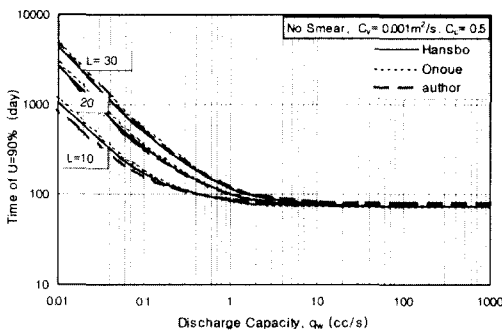
본 연구에서 제안한 해석방법과 Hansbo해 및 Onoue해의 3가지 압밀해석방법으로 배수재의 통수능별 압밀도 90%에 도달시간(t_{90})을 보면 그림 4.b), c)와 같이 3가지 해석방법이 잘 일치하는 결과를 보이고 있다.



a) 통수능별 침하량곡선 변화

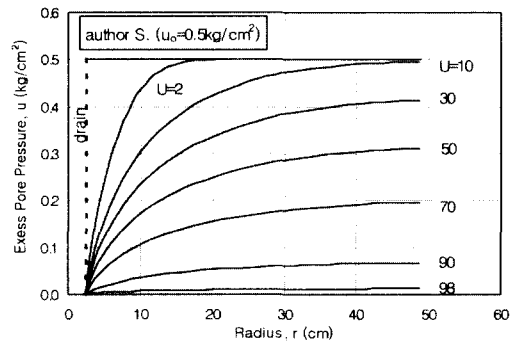


b) 압밀계수별 통수능의 압밀지연영향(압밀도 90%기준)

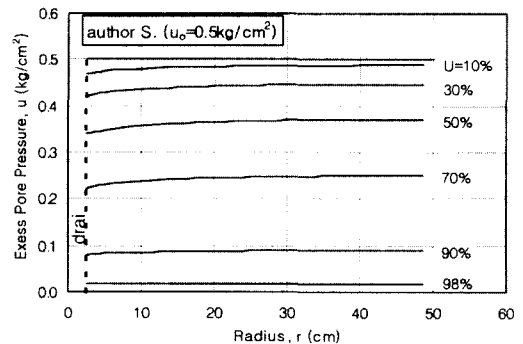


c) 배수재의 길이별 통수능의 압밀지연 영향(압밀도 90%기준)

그림 4. 기존 압밀해와 본 제안 압밀해석결과 비교

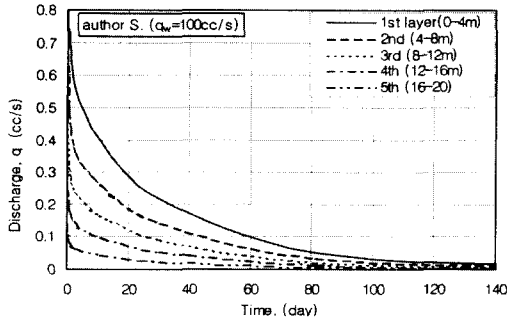


a) 통수능 $q_w=100\text{cc/s}$ 조건 과잉간극수압 분포변화

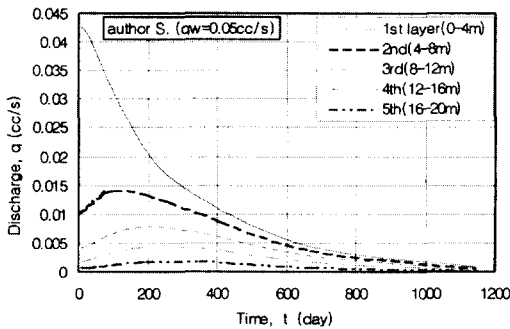


b) 통수능 $q_w=0.05\text{cc/s}$ 조건 과잉간극수압 분포변화

그림 5 반경방향의 과잉간극수압 분포



a) 배수재내 통수량변화(L=20m, $q_w=100$ cc/s)



b) 배수재내 통수량변화(L=20m, $q_w=0.05$ cc/s)

그림 6. 통수능의 크기별 배수재내 유량의 변화비교

2.4 본 제안 압밀해석 결과분석

2.4.1 통수능별 반경방향의 과잉간극수압 분포특성

압밀진행동안 반경방향의 과잉간극수압 분포를 보면 통수능이 $q_w=100$ cc/s로 충분히 큰 경우는 그림 5.a)와 같이 배수재내 간극수압이 거의 0으로 배수재내에서 수두손실이 거의 없음을 보여주고 있다. 그러나 압밀지연을 일으키는 적은 통수능($q_w=0.05$ cc/s)의 경우는 그림 5.b)와 같이 배수재내 과잉간극수압이 매우 크게 존재하고 있다. 그만큼 흡속의 반경방향의 동수경사가 적게 형성되어 흡으로부터 과잉간극수의 배출이 크게 지연되고 있음을 알 수 있다.

2.4.2 통수능별 압밀배수량의 변화

그림 6은 연직배수공법에서 압밀진행동안 각 심도별 배수재내 통수량(q)의 변화를 나타낸 것이다. 그림 6.a)는 배수재의 통수능이 $q_w=100$ cc/s로 충분히 큰 경우로서 압밀초기에 큰 통수량을 보이지만 시간이 경과하면서 급격히 감소하는 경향을 보일뿐 통수능에 의한 압밀지연현상은 볼 수 없다.

그러나 그림 6.b)는 통수능이 $q_w=0.05$ cc/s로 매우 부족한 경우로서 압밀초기에는 상층부의 물만 배제되고 상층부의 물이 어느 정도 배수된 뒤에 하층부의 물이 서서히 배

수되는 현상으로 압밀지연이 크게 발생되고 있음을 알 수 있다.

또한 그림 6.a)에서 압밀초기 1일 후에 배수재 1개의 배수량이 0.68cc/s에서 압밀도 90%에 도달하는 81일 후에는 0.051cc/s로 초기값의 1/13로 감소하는 경향을 보이고 있다.

2.4.3 통수능과 압밀소요시간(t_{90})변화

그림 4 b),c)에서 어느 통수능까지는 t_{90} 이 일정하지만 어느 통수능 이하에서는 t_{90} 이 급격히 증가하는 특성을 보이고 있다. 여기서 t_{90} 이 증가하지 않는 최소의 통수능 값 이상을 갖는 배수재를 선택하면 압밀지연이 발생되지 않는다는 것을 알 수 있다.

즉 이 값을 갖는 배수재를 사용하는 경우 연직배수공법의 압밀해석에서 웰저항을 무시할 수 있다.

2.4.4 본 해석방법의 제한성과 개선방법

본 해석에서는 압밀진행동안 수평방향 투수계수를 압밀계수 일정조건으로 변화되고, 압축지수도 일정조건으로 계산하였다. 검토하고자 하는 기초지반의 흙의 압밀특성이 압밀계수와 압축지수가 일정한 조건이 아니라면 투수계수와 압축지수를 각 유효응력에 따라 변화되는 상관관계로 반영되도록 프로그램을 보완하는 것이 가능하다.

3. 연직배수재의 소요통수능 평가

3.1 배수재의 소요통수능에 영향을 미치는 요소

3.1.1 흙의 압밀계수와 배수재의 길이

흙의 압밀계수와 배수재의 길이별로 통수능을 고려한 압밀해석을 실시하여 그림 7과 같은 통수능별 압밀도 90%에 도달하는 압밀소요시간 관계를 얻었다. 이 해석에서는 배수재의 통수능이 q_{wo} 로 압밀초기부터 종료될 때까지 일정한 값을 유지하는 것으로 보고 해석하였다.

그림에서 압밀도 90%에 도달하는 시간을 기준으로 할 때 압밀지연이 5%범위내인 소요통수능값을 그림에 점으로 나타내었다. 압밀지연을 발생시키지 않는 배수재의 소요통수능은 압밀계수와 처리심도에 비례하여 증가하는 특성을 보이고 있다.

3.1.2 압밀진행동안 배수재 통수능감소의 영향

연직배수공법에서 압밀이 진행되면서 압밀침하량만

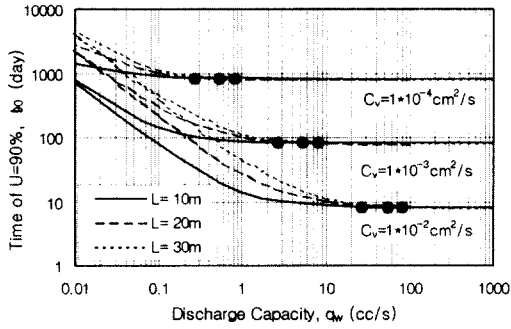


그림 7. 압밀계수와 배수재의 길이별 압밀소요시간변화
(No Smear, $C_c=0.5$, $\Delta\sigma_v=1 \text{ kg/cm}^2$,
압밀진행동안 배수재의 통수능감소 미고려)

큼 배수재의 수직변형과 필터의 인장변형등에 의하여 배수재의 통수능이 감소한다.

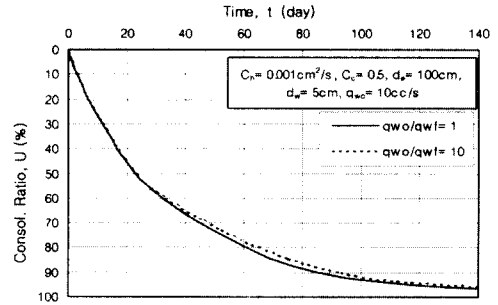
Bergado(1996)는 각종 변형조건의 통수능시험결과 배수재의 종류에 따라 차이가 크며, 변형에 따른 통수능의 감소율은 10%굴곡변형에서 14~66%, 20%굴곡변형에서 22~78%, 180° Twist조건에서 25~85%의 감소를 보이는 결과를 얻었다고 하였다.

이와 같이 배수재의 변형에 의해 통수능이 크게 감소하지만, 그림5.a)와 같이 흙으로부터 배수되는 물의 량도 시간이 경과하면서 급격히 감소하므로, 이 감소속도보다 통수능의 감소속도가 적다면 압밀지연에 미치는 영향은 적을 것이다.

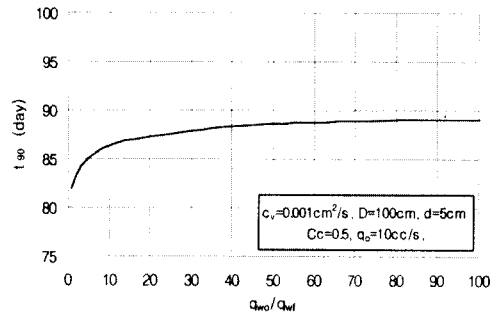
배수재의 통수능의 감소가 압밀지연에 미치는 영향을 분석하기 위하여 최종침하량(S_f)에서의 통수능(q_{wf})이 초기통수능(q_{wo})의 1/2, 1/4, 1/10, 1/20, 1/100로 감소하는 조건에 대하여 압밀해석을 하였다. 통수능의 감소속도는 침하량(S_f)에 비례하여 감소하는 것으로 보고, 즉 임의의 시간 t 에서 $q_w = q_{wo} - (q_{wo} - q_{wf}) \times S_t/S_f$ 의 관계식으로 통수능이 감소하는 것으로 보았다.

통수능 변화를 고려한 압밀해석결과 그림 8.a)와 같이 배수재의 통수능이 압밀초기보다 압밀완료시점에서 1/10로 감소하는 경우라도 압밀곡선은 거의 같으며, q_{wo}/q_{wf} 비별 압밀도 90%도달시간(t_{90})의 변화는 그림 8.b)와 같이 q_{wo}/q_{wf} 비가 클수록 t_{90} 이 증가하지만 q_{wo}/q_{wf} 비가 10일지라도 t_{90} 의 증가량은 5% 이내로 압밀진행동안 배수재의 통수능의 감소가 압밀지연에 미치는 영향은 매우 적은 것으로 해석되었다.

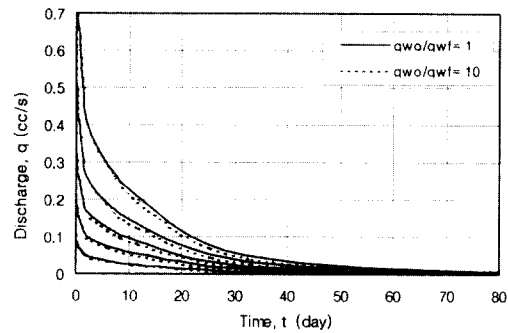
이는 그림 8.c)와 같이 흙으로부터 배수되는 물의 량이 압밀초기에는 크지만 압밀이 진행되면서 급격히 감소하는데,



a) 시간-압밀도 곡선



b) 통수능 감소비(Q_{wo}/Q_{wf})별 압밀소요시간(t_{90}) 변화



(c) 압밀진행동안의 배수재 내 통수량(q) 변화

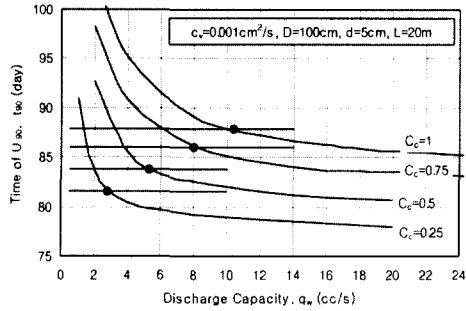
그림 8. 압밀진행동안 통수능 감소에 따른 압밀지연의 영향

그 감소가 배수재 통수능의 감소보다 훨씬 크기 때문이다.

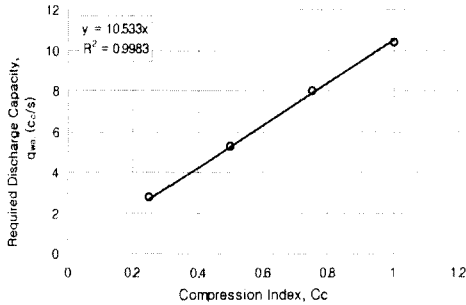
Holtz et al(1991), Bergado(1996), 차(1994)등의 통수능 시험결과를 보면 배수재의 변형에 의한 통수능의 감소비는 $q_{wo}/q_{wf}=10$ 이상으로 되는 것은 거의 없으며, $q_{wo}/q_{wf}=10$ 이상일지라도 압밀지연은 5%이내이므로 타설후 압밀진행동안 배수재의 통수능감소의 영향은 실용적인 면에서 무시할 수 있다고 판단된다.

3.1.3 흙의 압축지수(C_c)의 영향

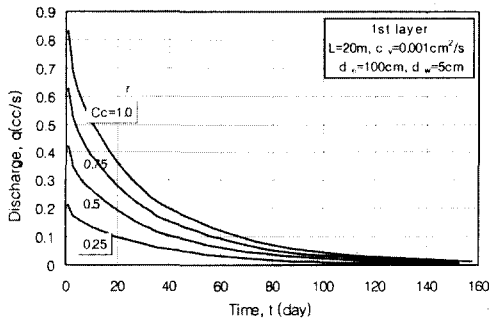
연직배수공법에 대한 통수능을 고려한 기존 압밀해석 방법에서는 압축지수(C_c)의 항은 없지만 압축지수가 크면 그만큼 같은 상재하중 조건에서 더 많은 물이 배제되므로 실제로는 더 큰 통수능이 필요함을 예측해 볼 수 있다.



a) 통수능별 압밀완료시간에 압축지수의 영향



b) 압축지수별 배수재의 소요통수능 변화



c) 배수재내 통수량변화

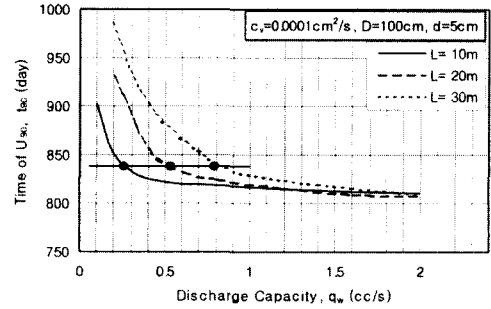
그림 9 배수재의 소요통수능에 미치는 압축지수의 영향

압축지수 0.25, 0.5, 0.75 및 1.0에 대하여 통수능별 압밀도 90%에 도달하는 시간을 구한 결과 그림 9.a,b)와 같이 압밀지연을 일으키지 않는 배수재의 소요통수능은 압축지수에 비례하여 커야하는 결과를 얻었다.

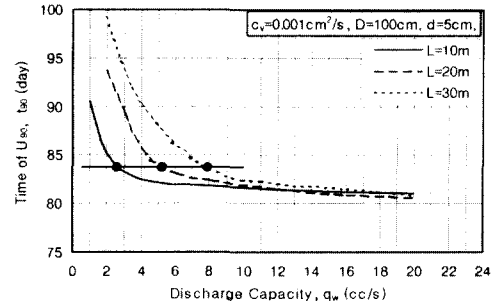
이는 그림 9.c)에서 압축지수(C_c)가 클수록 배수재를 통과하는 통수량이 C_c 에 비례하여 증가하는 것과 일치한다.

3.2 소요통수능결정시 고려요소

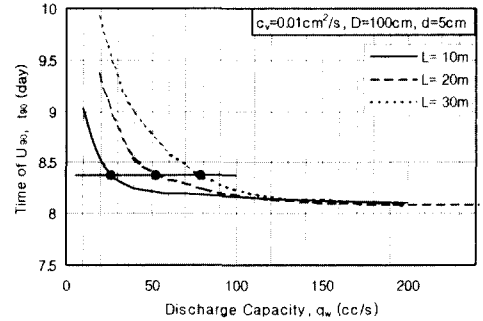
압밀지연을 발생시키지 않는 배수재의 소요통수능의 크기에 영향요소를 보면 흙의 압밀계수(c_v), 압축지수(C_c), 배수재의 타설길이(L), 통수능 감소비(q_{w0}/q_{wf}) 및 상재증가하중($\Delta\sigma_v$)이며 이들의 영향특성을 요약하면 표 3와



a) $c_h=0.0001 \text{ cm}^2/\text{s}$ 조건



b) $c_h=0.001 \text{ cm}^2/\text{s}$ 조건



c) $c_h=0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$ 조건

그림 10. 입밀계수, 배수재 길이변화를 고려한 입밀해석결과
[No Smear, $C_c=0.5$, $\Delta\sigma_v=0.5 \text{ kg/cm}^2$ 조건]

같다.

압밀지연을 일으키지 않는 배수재의 소요통수능은 흙의 압밀계수(c_v), 압축지수(C_c), 배수재의 타설길이(L)에 직선비례관계이므로 $c_v=0.0001, 0.001, 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$ (3조건), $C_c=0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ (4조건), $L=10, 20, 30\text{m}$ (3조건)에 대하여 각 통수능별 압밀해석을 실시하였다.

여기서 스미어존의 영향과 압밀진행동안 통수능감소의 영향은 그 영향이 미소하므로 고려하지 않았으며, 상재증가하중 $\Delta\sigma_v$ 의 영향은 적고 실제 성토속도를 고려하면 일시에 큰 하중이 재하되지 않으므로 성토고 2~3m를 기준으로 하여 $\Delta\sigma_v=0.5 \text{ kg/cm}^2$ 조건으로 검토하였다.

스미어가 없고 $\Delta\sigma_v=0.5 \text{ kg/cm}^2$ 조건으로 압밀계수와

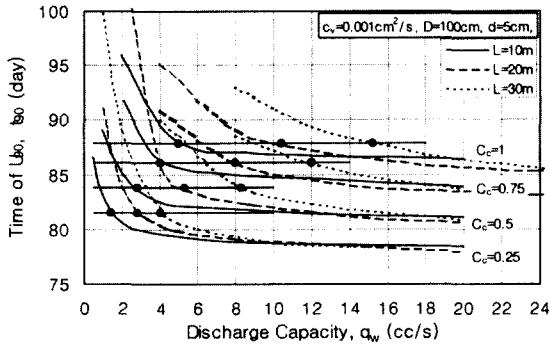


그림 11. 압축지수, 배수재 길이변화를 고려한 압밀해석결과
[No Smear, $c_v=0.001\text{cm}^2/\text{s}$, $\Delta\sigma_v=0.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 조건]

배수재의 길이를 변화시켜가면서 압밀해석을 실시하여 통수능별 압밀도 90%에 도달하는 시간(t_{90})관계를 구한 결과는 그림10와 같다. 또한 여기에 압축지수를 변화시켜가면서 압밀해석을 한 결과를 함께 나타내어 그림11과 같은 결과를 얻었다.

이 그림에서 압밀소요시간(t_{90})의 증가(압밀지연)가 5% 이내인 점을 찾아 점으로 나타내었다.

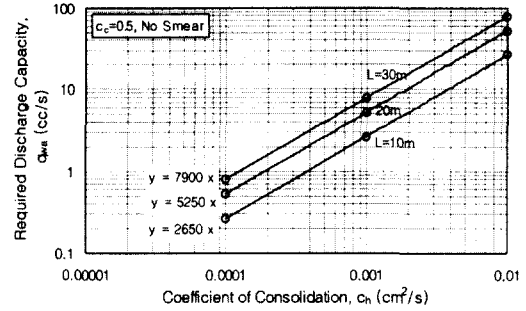
3.3 소요통수능의 결정

그림 10으로부터 압밀지연 5%이내인 압밀계수별 배수재의 소요통수능은 그림 12.a)와 같이 압밀계수에 비례하는 결과를 얻었다. 또한 그림 11로부터 배수재의 길이별 소요통수능은 그림 12.b)와 같이 배수재의 길이에 비례하고, 압축지수별 배수재의 소요통수능은 그림 12.c)와 같이 압축지수에 비례하는 결과를 얻었다.

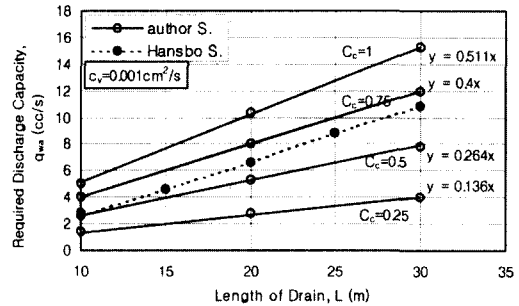
그 결과를 요약하면 표4와 같이 압밀계수(c_v), 배수재의 길이(L) 및 압축지수(C_c)와 직선비례관계로서 $q_{wa} = \alpha * (c_v * L * C_c)$ 관계식으로 볼 수 있으며, 각 검토조건에의 α 값의 평균값은 5.23이고 이 값들의 표준편차는 0.088로 매우 잘 수렴하고 있다. 여기에 안전율(1.5)을 고려하면 $\alpha = 1.5 * 5.23 \approx 8$ 로 하여 이를 식으로 나타내면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

표 3. 배수재 소요통수능(q_{wa})의 크기에 미치는 영향요소

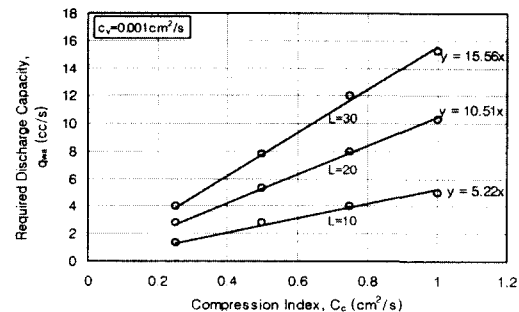
영향요소	영향특성	영향관계
흙의 압밀계수(c_v)	c_v 증가하면 q_{wa} 증가	직선비례
압축지수(C_c)	C_c 증가하면 q_{wa} 증가	직선비례
배수재의 타설길이(L)	L 증가하면 q_{wa} 증가	직선비례
통수능 감소비(q_{wo}/q_{wi})	q_{wo}/q_{wi} 증가하면 q_{wa} 증가	미소로 무시
상재증가하중($\Delta\sigma_v$)	$\Delta\sigma_v$ 증가하면 q_{wa} 감소	미소로 무시
배수재 타설간격(d_e)	영향없음	



a) 압밀계수와 소요통수능 관계



b) 배수재 타설길이의 소요통수능관계



c) 압축지수와 소요통수능관계

그림 12. 각 영향요소별 소요통수능관계

$$q_{wa} = 8 \times (c_v \times L \times C_c) \quad (10)$$

여기서 q_{wa} : 배수재의 소요통수능(cc/s)

C_c : 흙의 압축지수

c_v : 비교란조건의 흙의 수평방향 압밀계수(cm^2/s)

L : 배수재 관입심도(cm) 이다.

표 4. 각 영향요소와 소요통수능관계

관계	C _c	L(cm)	C _v (cm/s)	관계식	q _{wa} /(C _c *L*c _v)	비고
q _{wa} ≈C _v	0.5	1000		q _{wa} =2650C _v	5.300	그림12.a)
	0.5	2000		q _{wa} =5250C _v	5.250	
	0.5	3000		q _{wa} =7900C _v	5.267	
q _{wa} ≈L	0.25		0.001	q _{wa} =0.00136L	5.440	그림12.b)
	0.5		0.001	q _{wa} =0.00264L	5.280	
	0.75		0.001	q _{wa} =0.004L	5.333	
	1		0.001	q _{wa} =0.00511L	5.110	
q _{wa} ≈C _c		1000	0.001	q _{wa} =5.22C _c	5.220	그림12.c)
		2000	0.001	q _{wa} =10.51C _c	5.255	
		3000	0.001	q _{wa} =15.56C _c	5.187	
평균					5.264	
표준편차					0.088	
(평균+표준편차=5.35)				q _{wa} = 5.35 * C _c * L * C _v		
[(평균+표준편차)*안전율1.5=8]				q _{wa} = 8 * C _c * L * C _v		

5. 결론

여러 학자들에 의해 제안된 배수재의 소요통수능에 대한 기준값들은 0.32~50cc/s로 그 차이가 크고, 배수재의 직선, 굴곡등의 시험조건에 따라 통수능의 측정값도 차이가 크므로 실무에 적용이 매우 난해하다.

실무에 쉽게 적용할 수 있는 배수재의 소요통수능의 기준을 제안하기 위하여 배수재의 통수능 변화를 고려할 수 있는 압밀해석방법을 제안하고 Hansbo해 및 Onoue해와 동일 조건으로 비교해석을 통하여 제안해석방법을 검증하였다.

그리고 흙의 압밀계수, 압축지수, 배수재의 길이, 배수재의 통수능감소 및 배수재 타설간격 등의 여러조건에 대하여 압밀해석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 통수능을 고려한 압밀해석 결과 어느 값 이상의 통수능에서는 90%압밀도에 도달시간(t₉₀)이 일정하지만, 이 값 이하에서는 t₉₀이 급격히 증가하므로 이 값 이상의 통수능을 갖는 배수재를 선택하면 웰저항에 의한 압밀 지연을 막을 수 있으며, 이 경우 연직배수공법의 압밀 해석에서 배수재의 통수능을 고려하지 않아도 된다는 결론을 얻었다.
- (2) 기존 연구자료들을 보면 배수재의 변형에 의한 통수능의 감소가 크지만 그 감소비가 1/10이하로 되는 것은 거의 없으며, q_{w0}/q_{wf}=10일지라도 압밀지연은 5%이내로 압밀진행동안 배수재의 통수능감소의 영향은 실용

적인 면에서 고려하지 않아도 되는 결론을 얻었다.

- (3) 배수재의 소요통수능 값에 배수재 타설간격의 영향은 거의 없으며, 스미어의 영향은 미소하고 스미어를 고려하지 않는 것이 안전측이므로 이 두가지 영향요소는 고려하지 않아도 되는 결론을 얻었다.
- (4) 압밀지연시간 5%이내인 배수재의 소요통수능은 압밀계수(c_v), 배수재의 길이(L) 및 압축지수(C_c)와 직선비례관계로서 안전율 1.5을 고려하여 q_{wa} = 8 × (c_v × L × C_c) (cc/s) 이상이면 되는 상관식을 얻었다.

감사의 글

이 논문(과제번호 95-0600-09-02-3)은 한국과학재단의 지원을 받아 연구된 논문입니다.

참고 문헌

1. 김상규, 김현태, 홍병만(2000) "스미어층의 투수성변화를 고려한 연직배수공법의 압밀해석", 한국지반공학회지, 제 16권, 제2호, pp. 31~39.
2. Ali, F. H.(1991) "The flow behaviour of deformed prefabricated vertical drain", *Geotextiles and Geomembranes* 10 (1991) pp.235~248.
3. Bergado, D. T., Manivannan, R. & Balasubramaniam, A. S.(1996), "Proposed criteria for discharge capacity of prefabricated vertical drains", *Geotextiles and Geomembranes* 14 (1996) pp.481~505.
4. Broms, B. B., Chu, J., & Choa, V.(1994) "Measuring the discharge Capacity of band drains by a new drain tester", *Fifth international conference on Geotextiles, Geomembranes and related products* Singapore, 5~9 September (1994) pp.803~806.

5. Hansbo, S.(1979) "Consolidation of clay by band-shaped prefabricated vertical drains", *Ground Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp 21~25.
6. 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.
7. Hansbo, S.(1997), "Aspects of vertical drain design; Darcian or non-Darcian flow", *Geotechnique* 47, No.5 pp.983~992.
8. Holtz, R. D., Lancellotta, R., Jamiolkowsky, M., and Pedroni S. (1991), "Laboratory testing of prefabricated wick drains", *Geo-Coast'91*. 3-6, Sept. 1991, Yokohama 3/6 pp.311~316.
9. Onoue, A.(1988), "Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear into consideration", *Soils and Foundations*, Vol. 28, No. 4, pp. 165-174.
10. 朴永穆(1994) "低平地に堆積する海成粘土の土質特性と鉛直排水工法による地盤改良に関する研究" 博士學位論文 日本, pp. 31~60.

(접수일자 2000. 8. 29)