

연약지반위에 성토시 수평배수층의 소요통수능

Required Discharge Capacity of Horizontal Drains for Fills on the Soft Ground

김 현 태 ^{*1}	Kim, Hyun-Tae
김 상 규 ^{*2}	Kim, Sang-Kyu
공 길 용 ^{*3}	Kong, Kil-Yong

Abstract

Horizontal drains are installed on the ground surface in order to drain water from soft ground during preloading. According to previous studies(for example, Giroud(1981) and Korea Highway Corporation (1998)), the discharge capacity of the horizontal drains is influenced by loading period of surcharge or average settlement rate, and big discharge capacity is required when the period is short. Using a new consolidation theory applicable to vertical drain, its discharge capacity has been re-examined and a practical formula that can determine its capacity is proposed in this paper. It is known that the effect of the fills period of surcharge is neglected, when the overall consolidation settlement can be achieved within 5% of delay. It is also disclosed that the discharge capacity is proportional to compression index, coefficient of consolidation and a square of the drain length of horizontal drain.

요 지

선행압밀공법에서 지반으로부터 배출되는 물을 신속히 배수시키기 위해 연약지반상에 수평배수층을 설치한다. 종전의 연구에 의하면(예, Giroud(1981), 한국도로공사(1998)), 배수층의 통수능은 성토하중의 성토기간 또는 압밀속도의 영향을 받으며, 성토기간이 짧을 때에는 과도한 배수능이 요구된다. 이 논문에서는 선행압밀공법에 적용 가능한 새로운 압밀해석방법을 사용하여 소요통수능을 재검토하고 새로운 실용공식을 제안하였다. 전반적인 압밀침하량이 5%이내에서 지연될 때에는 소요통수능은 성토기간의 영향을 받지 않는다는 것을 알게 되었다. 또한 소요통수량은 압축지수, 압밀계수 및 수평배수층의 배수거리의 제곱에 비례한다는 것도 밝혀졌다.

Keywords : Discharge capacity, Fills, Horizontal drains, Preloading

1. 서론

연약지반위에 성토시 지반으로부터 압밀배수되는 물을 원활히 배제하기 위하여 지표면에 필터용 모래, 토목섬유 등으로 수평배수층을 형성하고 그 위에 성토를 한다. 이때 이 배수층의 통수능은 압밀지연이 발생되지

않도록 충분히 커야한다.

Giroud(1981)는 수평배수층의 소요통수능에 대하여 배수층내 발생하는 최대손실수두가 성토하중에 의하여 발생하는 전과잉간극수두의 1/8이하가 되는 경험적인 계산식을 제안하였으나 수두비가 1/8일 때 압밀지연이 얼마나 발생되며 허용범위에 있는지 확인이 필요하고,

*1 정회원, 농업기반공사 당진지부 기반조성부장

*2 정회원, 동부산대 학장

*3 정회원, 농업기반공사 농어촌연구원 주임연구원

또한 이 제안 식은 성토기간에 너무 크게 영향을 받으므로 이에 대한 확인이 필요하다.

연약지반으로 부터 압밀배수되는 물의 량을 보면 성토직후에 가장 크고 시간이 경과하면서 급격히 감소한다. 그러므로 수평배수층의 통수능이 부족하여 압밀초기에 압밀지연이 발생할지라도 시간이 경과하면서 압밀지연의 영향은 크게 감소한다.

그러므로 수평배수층내에 발생하는 최대수두비로 소요통수능을 결정하는 것보다는 전 압밀기간으로 볼 때 압밀지연이 허용 범위 내에 있는 배수층의 한계통수능을 소요통수능으로 결정하는 것이 타당하다.

본 연구에서는 수평배수층의 통수능을 고려할 수 있는 압밀해석방법을 개발하고, 이 해석을 통하여 성토기간이 소요통수능에 미치는 영향을 분석하였으며, 흙의 압밀계수, 압축지수, 수평배수거리 등을 고려하여 수평배수층의 소요통수능을 결정하는 관계식을 제안하였다.

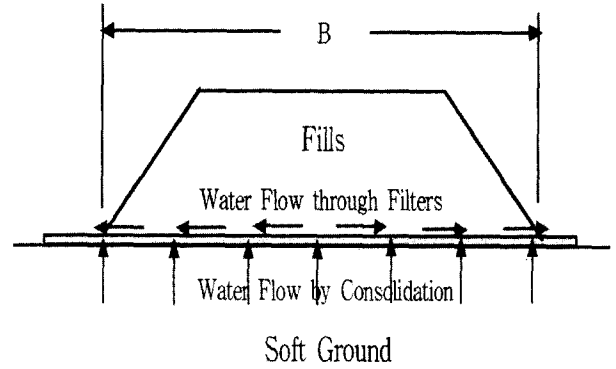


그림 1. Giround(1981)제안 수평배수층의 통수능 계산 모형도

2. 배수층의 통수능을 고려한 압밀해석방법

2.1 기존 소요통수능 기준 검토

2.1.1 Giroud 제안식

그림1과 같이 연약지반 위에 필터용 토목섬유 또는 모래층을 포설하고 그 위에 성토를 하면 성토하중에 의하여 기초지반으로부터 압밀배수되는 물이 이 배수층을 통하여 측방향으로 배제된다. 이 때 배수층의 통수능이 부족하면 배수층내 손실수두가 크게 발생하여 지반의 압밀이 지연되므로 통수능이 충분히 큰 배수층이 필요하다.

Giroud(1981)는 수평배수층의 소요통수능에 대하여 배수층내 최대손실수두가 성토하중에 의하여 발생하는 전과잉간극수두의 1/8이하이면 압밀지연이 허용범위 내에 있는 것으로 보고 식 (1)과 같은 경험적인 기준을 제안하였다.

$$q_{ma} = \frac{B^2 k_s}{(c_v T)^{1/2}} \quad (1)$$

여기서,

q_{ma} : 소요통수능(동수경사가 1일 때) ($m^3/min/m$)

C_v : 흙의 압밀계수(m^2/min)

B : 필터매트의 폭(m), (필터매트 최대배수거리의 2배)

K_s : 흙의 투수계수(m/min)

T : 성토기간(min)이다.

2.1.2 도로공사 설계기준

한국도로공사(1996, 1998)의 수평배수층(Sand Mat)에 대한 소요통수능 기준을 보면 성토재하기간동안의 평균 동수구배가 수평배수층내 자유수면을 갖는 조건, 즉 위치수두만 존재하고 압력수두가 발생되지 않는 조건으로 식 (2)와 같다.

$$\Delta H_m = \frac{L^2 \cdot S}{2 \cdot K \cdot H} \quad (2)$$

여기서,

K : 모래의 투수계수(cm/day)

S : 성토재하시의 평균침하속도(cm/day)

L : 수평배수층의 배수거리(m)

H : Sand Mat의 두께(cm)

ΔH_m : Sand Mat내의 압력수두로, $\Delta H_m \leq H$ 인 H 를 결정하면 된다.

2.1.3 기존 제안식 및 설계기준의 문제점

Giroud(1981)의 소요통수능값은 그림2와 같이 성토기간(T)에 너무 크게 영향을 받는다. 예컨대, 이 그림에서 $B=40m$, $c_v=0.01cm^2/s$ 조건에서 $T=100$ 일 일 때 $17cm^3/s/m$ 이지만, 10일일 때 53.5, 1일이면 170으로 그 차이가 너무 크다. 이 제안식에서 배수층내 발생하는 최대손실수두가 전과잉간극수두의 1/8이하이면 압밀지연이 없는 것으로 보고 유도하였는데 이 수두비는 성토기간에 따라 차이가 크기 때문에 소요통수능은 성토기간에 크게 영향을 받게 된다.

또한 한국도로공사(1998)의 설계기준 값은 그림3과 같이 성토속도와 상재중가 유효하중에 따라 소요통수능 값은 매우 큰 차이를 보이고 있다.

여기서 수두비가 1/8일 때 압밀지연이 얼마나 발생되

며, 허용범위에 있는지 확인할 필요가 있으며, 성토기간과 상재증가하중의 크기가 수평배수층의 소요통수능에 어느 정도의 영향을 미치는지 확인할 필요가 있다.

압밀지연이란 소요압밀도에 도달하는 시간이 지연되는 것으로 압밀초기에 어느정도 압밀지연이 발생되어도 소요압밀도에 도달되는 시간이 허용범위에 있다면 문제가 되지 않으므로 전 압밀시간으로 볼때 허용범위에 있는 한 계통수능을 소요통수능으로 결정하는 것이 타당하다.

2.2 수평배수층의 통수능을 고려한 압밀해석방법 전개

2.2.1 가정조건

1) Darcy의 법칙

기초지반과 토목섬유내 물의 흐름은 Darcy의 법칙을 적용하였다.

2) 압축지수와 재압축지수 일정

실용적인면에서 유효응력의 크기에 관계없이 일정하게 적용할 수 있는 압축지수와 재압축지수를 이용하여 유효응력과 간극비관계를 구하였다.

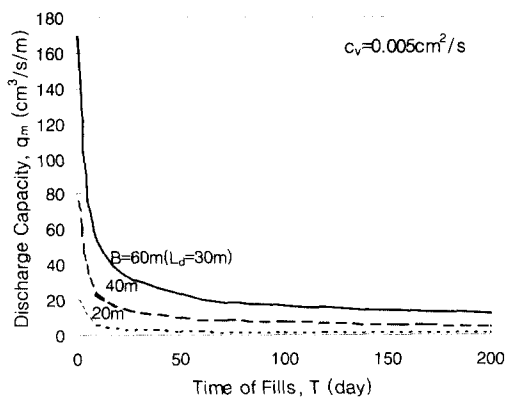
3) 기초지반의 $\sigma_v' - k_h$ 관계 변화 고려

비교란조건인 기초지반 흙에 대하여 압밀계수일정으로 보고 식 (3)과 같은 관계식으로 투수계수가 유효응력에 따라 변화되는 상관식을 적용하였다.(김, 2000)

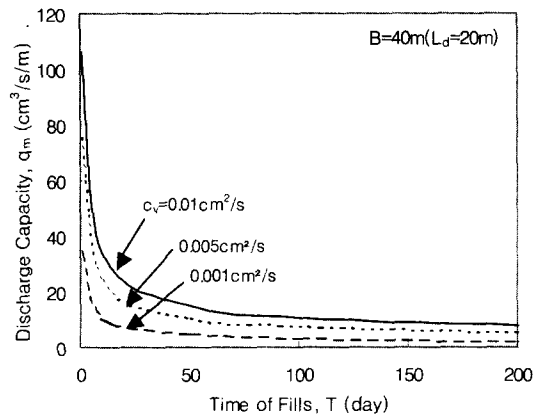
$$k_v \approx \frac{0.434 C_c c_v}{(1 + e_0) \sigma_v'} \quad (3)$$

2.2.2 해석이론 및 해석방법 전개

연약지반위에 수평배수층을 포설하고 그 위에 성토시 그림 4와 같이 1) 기초지반내에 수직방향의 흐름과

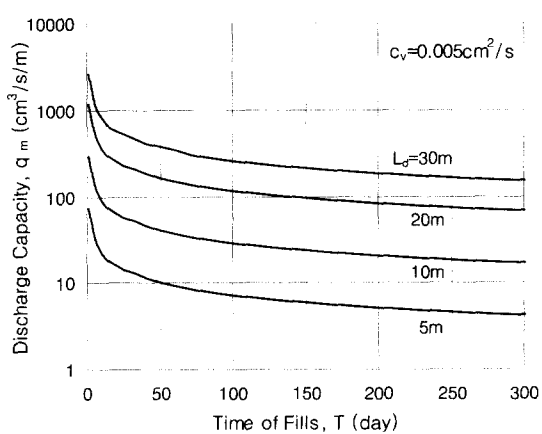


(a) 수평배수거리(L_d)의 영향

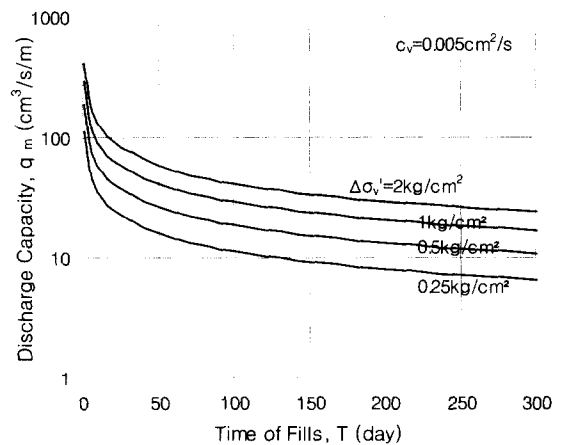


(b) 압밀계수(c_v)의 영향

그림 2. Giroud(1981)의 성토속도별 소요통수능



(a) 수평배수거리(L_d)의 영향



(b) 상재증가 유효응력($\Delta \sigma_v'$)의 영향

그림 3. 한국도로공사(1998)의 성토기간별 소요통수능

2) 기초지반에서 압밀배수된 물이 수평배수층을 통하여 배제되는 과정으로 나누어 생각해볼 수 있다.

1) 기초지반내에 수직방향 압밀배수 과정

성토를 하면 기초지반 내에 과잉간극수압(u_o)이 발생되고 이로 인해 수직방향으로 동수경사가 형성된다. 이 동수경사에 의해 지반내의 과잉간극수가 연직방향으로 배제되며, 이 배제되는 유속은 동수경사와 흙의 투수계수에 비례한다. 통수능이 적어 수평배수층 내에 손실수두가 크게 발생되면 그만큼 동수경사가 적어지고 유속도 적어져 압밀지연이 발생된다.

기초지반내에 연직방향의 흐름만을 고려하여 그림 4.(a)와 같이 유한요소계로 나누어 생각해 보자. 임의시간에 동수경사로부터 미소시간(Δt)동안 i 요소에 흘러들어오는 유량과 나가는 유량을 계산하면 그 차이만큼 i 요소의 간극비와 간극수압이 감소하고 유효응력이 증가하는 과정을 반복하여 계산하면 지반의 압밀과정을 구할 수 있다.

수직방향배수에서 시간 Δt 동안 i 요소에서 $i-1$ 요소로 흘러나가는 유량은

$$\Delta q_i = -\frac{k_{hi}}{\gamma_w} \frac{\Delta u_i}{h_i} L_i \Delta t \quad (4)$$

의 식이 된다.

i 요소의 체적변형율(ϵ_{vi})은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\epsilon_{vi} = \frac{q_i - q_{i+1}}{L_{i0} \cdot h_{i0}} \quad (5)$$

여기서 q_i 는 i 요소를 통과하는 유량이고, q_{i+1} 은 $i+1$ 요소로부터 흘러 들어오는 유량이다.

i 요소의 간극비변화(Δe_i)는 다음 식으로 나타낼 수 있으며,

$$\Delta e_i = \epsilon_{vi}(1 + e_o) \quad (6)$$

여기서 정규압밀조건에 대하여

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

과압밀영역에 대하여

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

시간 t_{j+1} 에서 i 요소의 유효응력($\sigma_{v_{j+1}}'$)은 다음 식으로 구하고

$$\sigma_{v_{j+1}}' = 10^{(\Delta e/C_c + \log \sigma_{v_j}')} \quad (7)$$

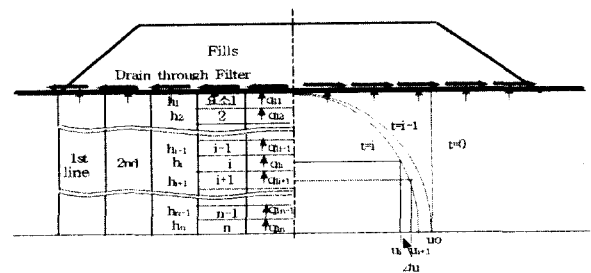
Δt 동안의 과잉간극수압 소산량(Δu_i)은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\Delta u_i = \sigma_{v_{j+1}}' - \sigma_{v_j} \quad (8)$$

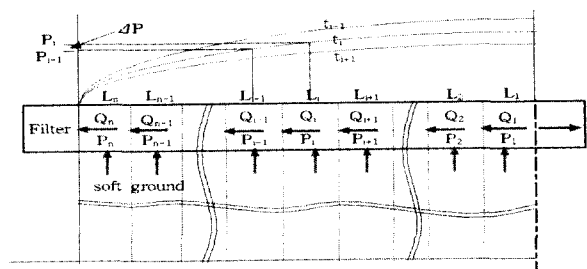
이 관계로부터 각 요소의 Δt 동안의 과잉간극수압소산량(Δu_i)을 구할 수 있으며, 시간 t_{j+1} 일 때의 과잉간극수압 분포도를 얻을 수 있다.

시간 t_{j+1} 일 때의 과잉간극수압분포를 알면 이때의 동수경사로부터 다음 단계의 Δt 동안의 물의 흐름을 계산하여 간극비변화량(Δe)과 과잉간극수압 소산량(Δu_i)을 다시 계산하는 과정을 그림 4와 같이 반복하면 압밀진행과정을 구할 수 있다.

2) 수평배수층의 통수능을 고려한 압밀해석방법 전개
수평배수층내의 물의 흐름은 그림 4.(b)와 같이 지반으로부터 배수층로 흘러들어오는 물은 성토단면 외부로 흐르므로 배수층을 흐르는 물의 양은 성토단면



(a) 연약지반위에 성토시 압밀배수특성



(b) 수평배수층내 배수특성

그림 4. 수평배수층의 통수능을 고려한 압밀해석 모식도

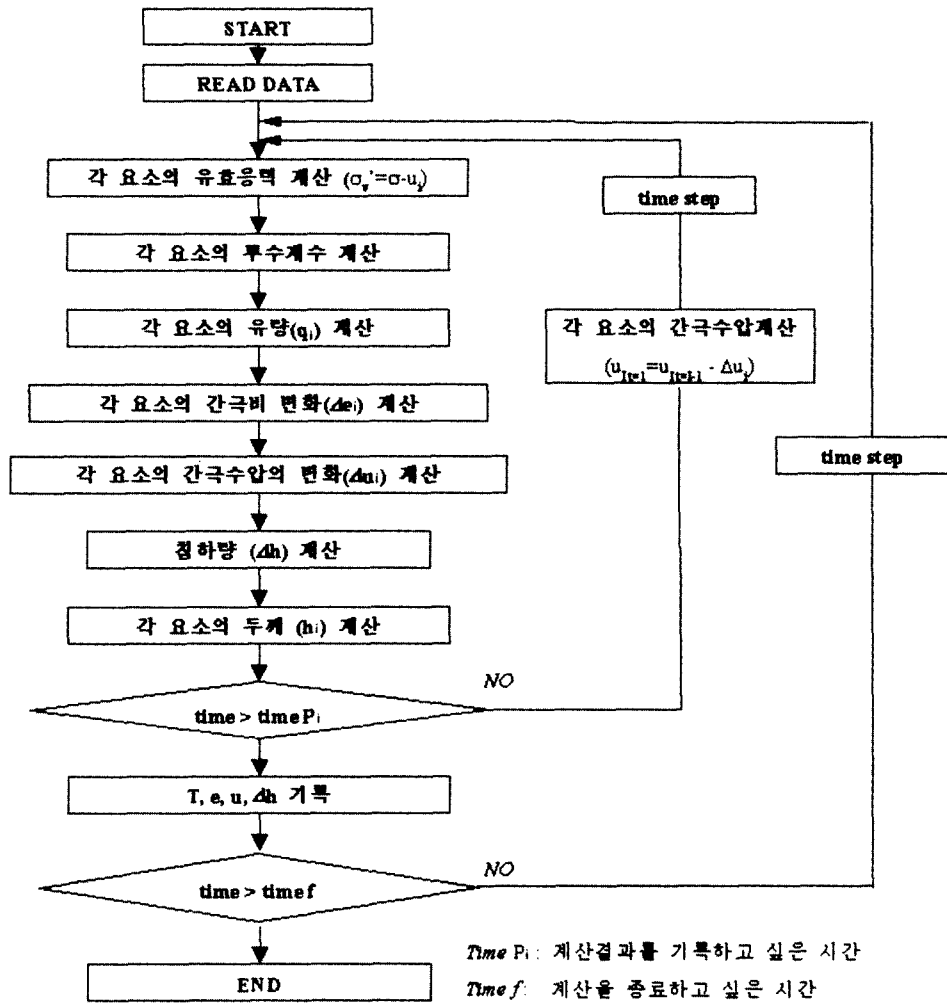


그림 5. 지반내 수직방향배수 압밀해석 흐름도

중심부는 적고 외측부가 가장 크다.

그림에서 수평배수층내 i 층중심에 흐르는 물의 량 (Q_i)은 기초지반으로부터 배수층으로 압밀배수되는 량 (q_n)의 합으로서 이를 식으로 나타내면

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= \frac{q_1}{2} + q_2 + \dots + q_n \\
 Q_2 &= \frac{q_2}{2} + q_3 + \dots + q_n \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 Q_{n-1} &= \frac{q_{n-1}}{2} + q_n \\
 Q_n &= \frac{q_n}{2}
 \end{aligned} \tag{9}$$

수평배수층내에 물의 흐름에 대하여 Darcy의 법칙을

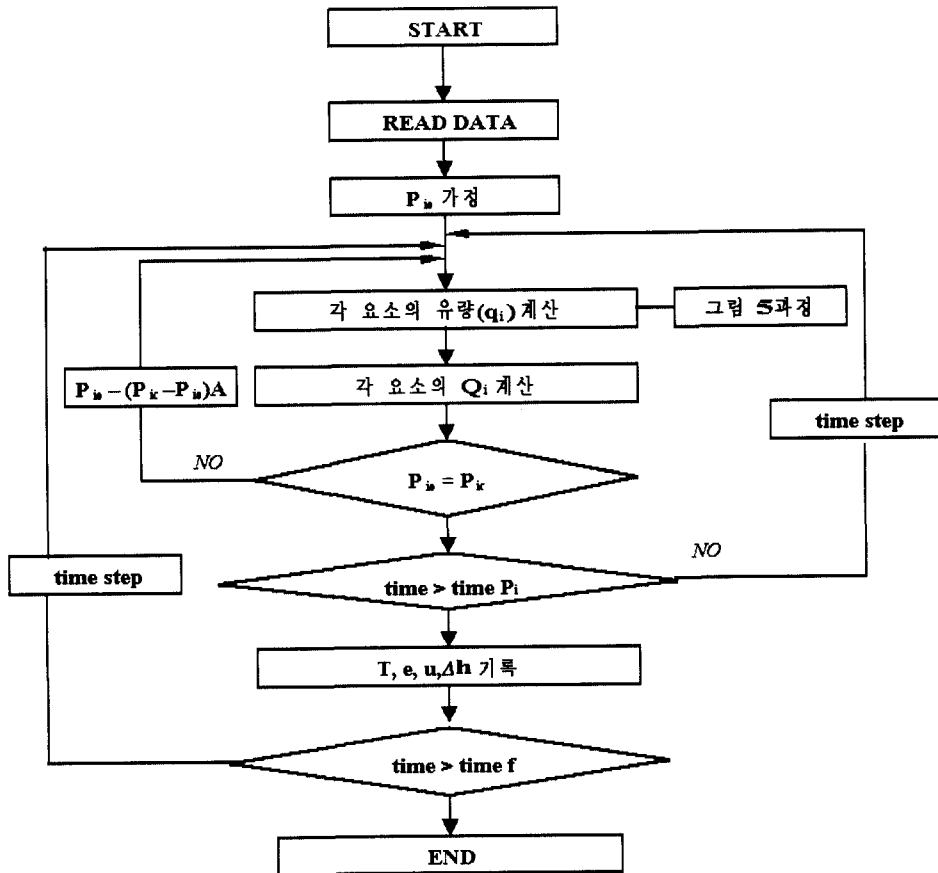
적용하여 각 요소의 소요배수량을 통수시키기 위한 손실수두 (Δh_i)를 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \Delta h_1 &= \frac{Q_1}{q_{w1}} \cdot L_1 \\
 \Delta h_2 &= \frac{Q_2}{q_{w2}} \cdot L_2 \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 \Delta h_{n-1} &= \frac{Q_{n-1}}{q_{wn}} \cdot L_{n-1} \\
 \Delta h_n &= \frac{Q_n}{q_{wn}} \cdot L_n
 \end{aligned} \tag{10}$$

여기서, q_{wi} : 수평배수층 i 요소 of 통수능

L_i : 수평배수층 i 요소 of 길이

수평배수층내 각 요소 중앙의 침출수압 (p_i)은 다음과 같다.



A : 보간계수
 Time P_i : 계산결과를 기록하고 싶은 시간
 Time f : 계산을 종료하고 싶은 시간

그림 6. 수평배수층의 통수능을 고려한 압밀해석프로그램 흐름도

$$\begin{aligned}
 p_1 &= \frac{\Delta h_1}{2} \times \gamma_w \\
 p_2 &= (\Delta h_1 + \frac{\Delta h_2}{2}) \times \gamma_w \\
 p_3 &= (\Delta h_1 + \Delta h_2 + \frac{\Delta h_3}{2}) \times \gamma_w \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 p_n &= (\Delta h_1 + \Delta h_2 + \dots + \frac{\Delta h_n}{2}) \times \gamma_w \quad (11)
 \end{aligned}$$

각 층의 Q_i 를 통과시키기 위하여는 수평배수층내에 수압 p_i 가 필요하게 된다. 즉 통수능이 충분히 커서 손실 수두가 없다면 $p_i=0$ 이 되어 흠의 압밀속도에 영향을 미치지 않겠지만, 통수능이 적어서 p_i 가 크다면 흠속에 형성되는 수두경사가 p_i 값만큼 감소하여 압밀이 지연되게 될 것이다.

수평배수층내에 수압이 p_i 일 때 흠속에 형성되는 수두

경사에 의해 흐르는 물의 양을 q_i 라고 하면 배수층이 흘러보내야 하는 통수량(Q_i)은 식(9)와 같다.

여기서 p_i 가 크면 q_i 는 감소하고 Q_i 는 증가하게 된다. 즉 Q_i 와 p_i 가 평형을 유지하는 p_i 조건으로 흠과 배수층 내에서 물이 흐르는 것이므로, 압밀시작부터 Δt 시간 간격으로 임의 시간에 Δt 동안 Q_i 와 q_i 가 평형을 유지하는 p_i 를 시산법으로 구하고 배수층내에 수두 p_i 가 있는 조건에 수직배수 압밀해석을 그림 6의 흐름도와 같이 수행한다.

2.3 실예에 의한 해석방법의 검증

1) 입력자료

압밀해석에 사용한 기초지반조건 및 토질정수는 표 1과 같은 가정조건에 대하여 실시하였다. 본 해석방법을 검증하기 위하여 투수계수변화를 Terzaghi의 압밀계수 일정조건을 만족시키는 식 (3)과 같이 변화하는 조건에 대하여

표 1. 프로그램 검증을 위한 기초지반조건 및 토질정수(예)

구분	토질정수
초기 유효응력 (σ_{vo}')	0.2 kg/cm ²
상재증가 유효응력 ($\Delta\sigma_v$)	0.5 kg/cm ²
초기간극비 (e_0)	1.23
압축지수 (C_c)	0.5
압밀계수 (c_v)	5×10^{-3} cm ² /s
연약지반심도	10 m

본 제안해석과 Terzaghi 압밀해석결과를 비교하였다.

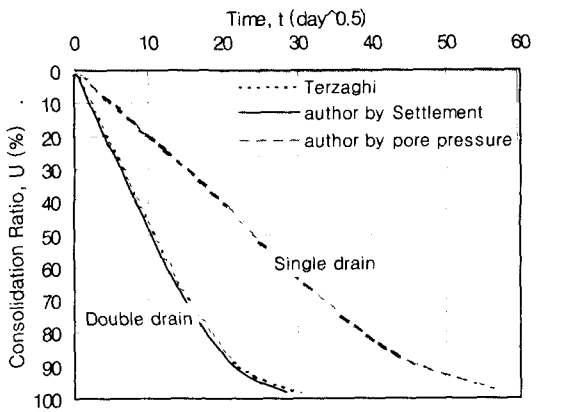
2) 압밀해석결과 비교

표 1 조건에 대하여 Terzaghi해와 본 제안 압밀해석결과 시간-압밀도곡선은 그림 7.(a)와 같이 침하량을 기준으로 한 압밀도는 잘 일치하는 결과를 보이고 있다. 그러나 간극수압을 기준으로 한 압밀도는 차이를 보이고 있으며 각 압밀도별 과잉간극수압분포도 그림 7.(b)와

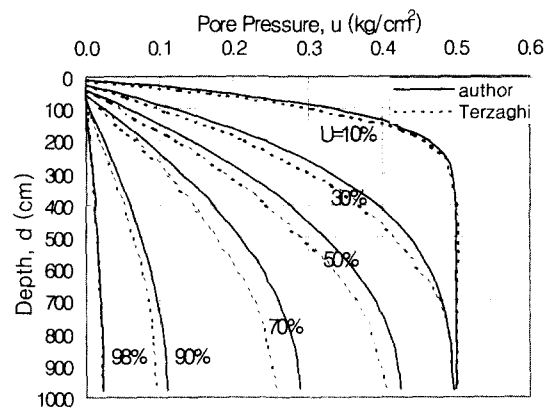
같이 유사한 경향을 보이지만 그 값에 차이가 있다.

이 차이는 Terzaghi 압밀이론의 $\alpha = \frac{\sigma_{vo}' + \Delta\sigma_v'}{\sigma_{vo}'} \approx 1$ 인 조건, 즉 성토전초기응력 (σ_{vo}')에 비하여 성토에 의한 증가응력 ($\Delta\sigma_v'$)이 무한히 적은 가정조건이지만, 실제 현장조건은 α 가 1보다 훨씬 크며, 본 해석조건은 $\alpha=2.333$ 으로, 이로 인하여 과잉간극수압과 압밀 침하량에 의한 압밀도에 차이가 있기 때문이다. (Davis, 1969., Renato, 1995).

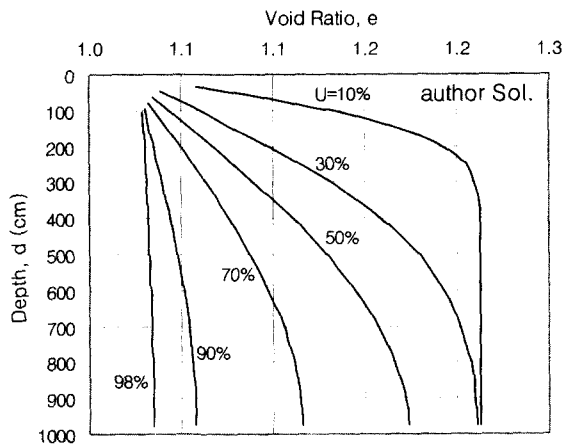
이를 증명하기 위하여 $\sigma_{vo}'=10$ 이고 $\Delta\sigma_v'=0.5$ 으로 $\alpha=1.05$ 인 조건에 대하여 압밀해석을 하여 비교한 결과 그림 8.(a)와 같이 간극수압과 침하량으로 나타낸 시간-압밀도곡선이 거의 일치하며 Terzaghi해와 본 제안 해석의 각 압밀도별 과잉간극수압분포곡선도 그림 8.(b)와 같이 잘 일치한다.



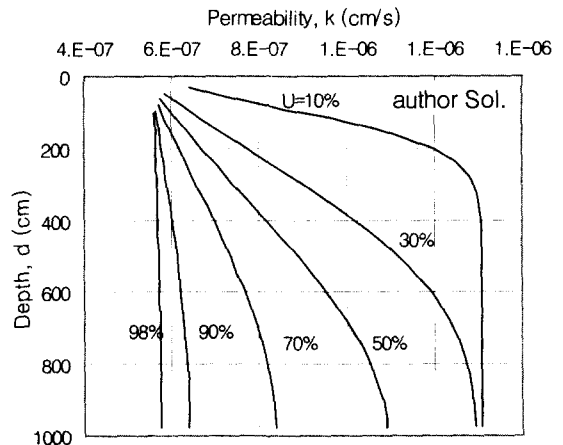
(a) 시간 - 압밀곡선



(b) 과잉간극수압분포도(일면배수)

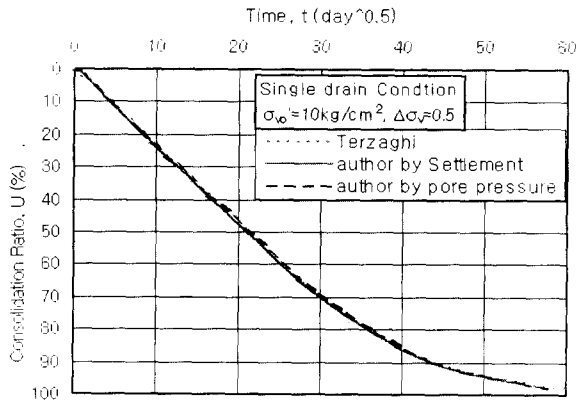


(c) 간극비 변화(일면배수)

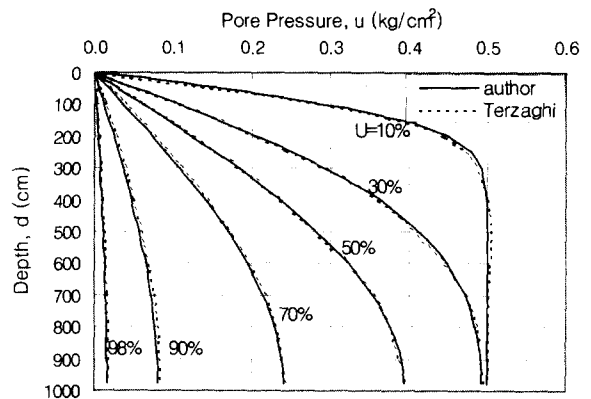


(d) 투수계수변화(일면배수)

그림 7. 본 연구 제안 압밀해석과 Terzaghi해석결과 비교($\alpha=2.333$ 조건)

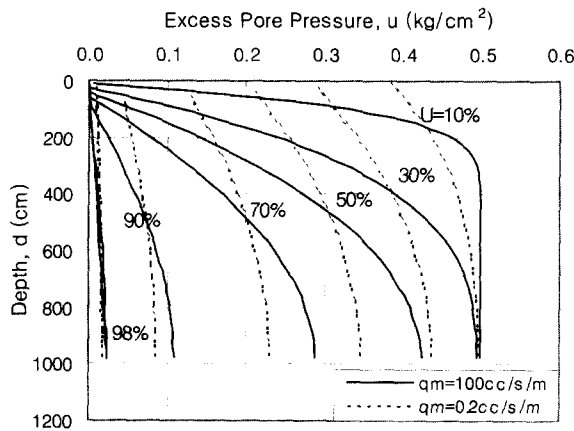


(a) 시간 - 압밀곡선

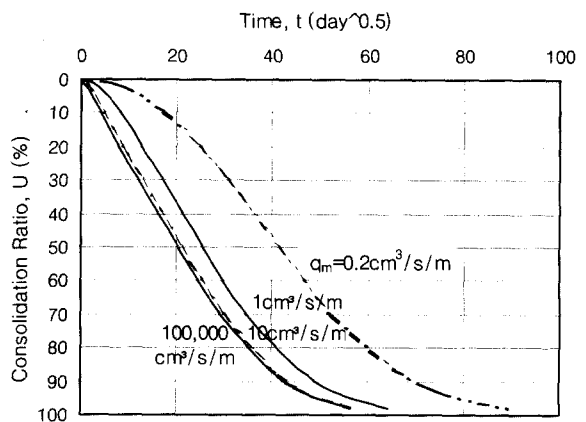


(b) 과잉간극수압분포도(일면배수)

그림 8. 본 연구 제안 압밀해석과 Terzaghi해석결과 비교($\alpha = 1.05$ 조건)

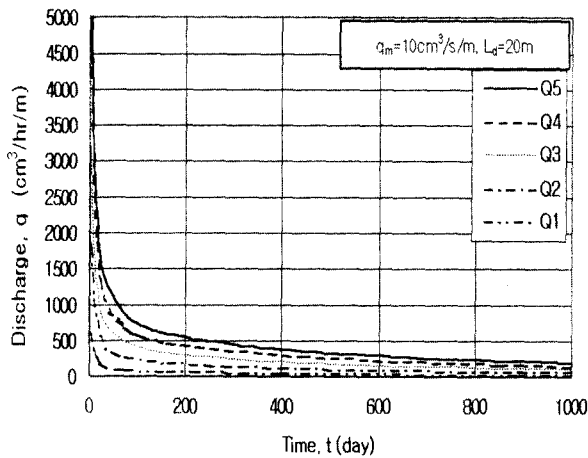


(a) 과잉간극수압 변화곡선

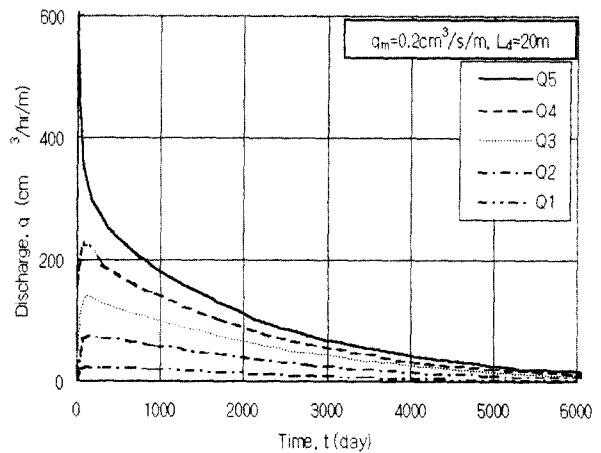


(b) 시간-압밀도 곡선

그림 9. 필터매트의 통수능에 따른 압밀지연 특성



(a) 수평배수층의 통수능이 충분히 큰 경우



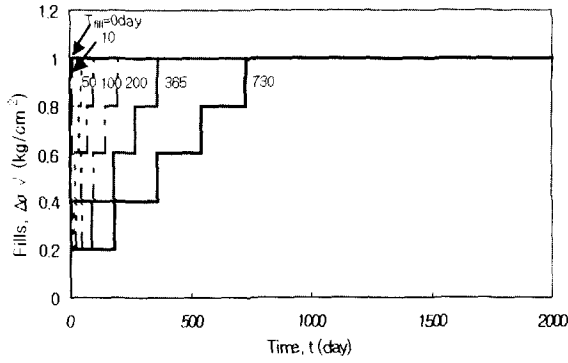
(b) 통수능이 압밀지연을 일으키는 경우

그림 10. 통수능의 크기별 배수재내 유량의 변화비교

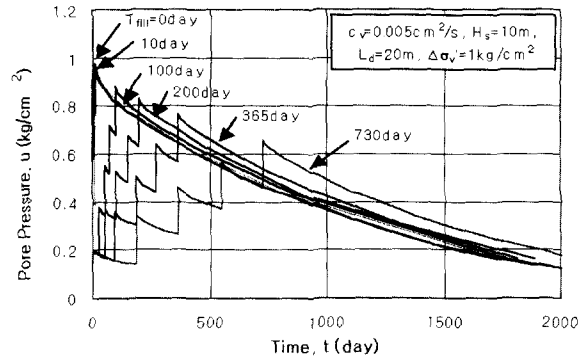
2.4 수평배수층의 통수능을 고려한 압밀해석 결과분석

본 연구의 압밀해석방법으로 수평배수층의 통수능을 고려

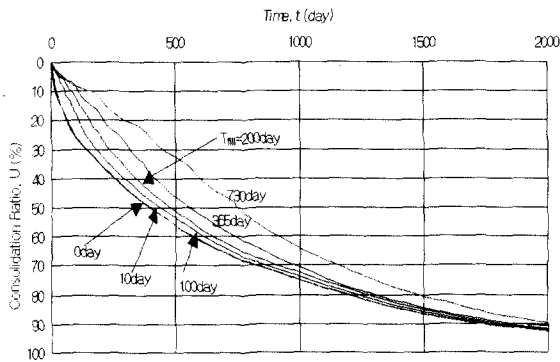
한 압밀해석결과 그림 9(a)와 같이 배수층의 통수능이 충분히 큰 경우는 배수층내 간극수압이 거의 0으로 압밀층내 등수경사가 크게 형성되지만, 통수능이 부족한 경우는 배수층내 간



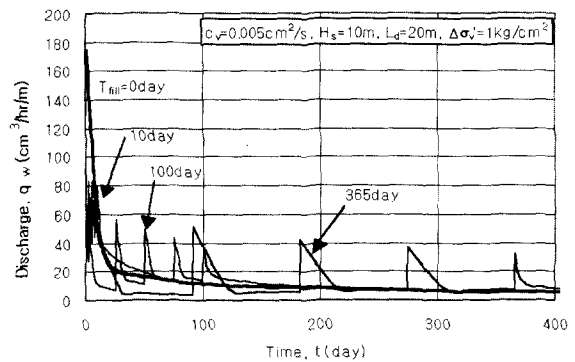
(a) 성토기간



(b) 성토기간별 지중의 평균과잉간극수압 변화



(c) 성토기간별 압밀도곡선



(d) 성토기간별 수평배수층의 최대통수량변화

그림 11. 성토기간별 압밀특성변화

극수압이 크게 존재하여 압밀층내 동수경사가 적어 그림 9.(b)와 같이 압밀지연이 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

압밀과정동안 압밀배수량의 변화 즉 수평배수층을 흐르는 통수량의 시간별 변화를 보면 그림 10.(a)와 같이 통수량이 압밀초기에는 매우 크지만 시간이 경과하면서 급격히 감소하므로, 대부분의 압밀지연은 압밀초기에 발생되고 압밀 후반에는 흙에서 배수되는 물의 양이 적어 배수층의 통수능이 시간경과에 따라 크게 감소하지 않는 한 압밀지연이 발생되지 않는다는 것을 알 수 있다.

그림 10.(a)는 통수능이 충분히 큰 배수층의 경우와 그림 10.(b)는 배수층의 통수능(q_m)이 부족하여 압밀지연이 발생하는 경우의 배수층내 통수량(q)의 변화를 나타낸 것이다. 통수능 $q_m = 100 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{m}$ 일때는 그림 10.(a)와 같이 전층이 압밀초기에 큰 통수량을 보이지만 시간이 경과하면서 급격히 감소하는 경향을 보일 뿐 통수능에 의한 압밀지연현상은 볼 수 없다.

그러나 통수능이 $q_m = 0.2 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{m}$ 로 부족한 경우는 그림 10.(b)와 같이 배수층의 통수능이 부족하여 압밀초기에는 성토단면 외측부의 물만 배제되고 외측부의 물이 어느 정도 배제된 뒤에 중심부의 물이 서서히 배제되는 현상으로 압밀지연이 매우 크게 발생되고 있음을 알 수 있다.

3. 성토기간을 고려한 압밀해석과 소요통수능

3.1 성토기간을 고려한 압밀해석방법과 해석결과

성토공사기간을 그림 11과 같이 즉시(0일), 10, 50, 100, 200, 365, 730일간 성토하는 조건으로 각 성토단계마다 $\Delta \sigma'_v = 0.2 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 의 하중이 5단계로 성토되는 것으로 계산하였다.

성토기간별 지중에 평균과잉간극수압의 발생 및 소산은 그림 11.(b)와 같이 성토기간이 짧을수록 크게 발생하고 성토기간이 길수록 적은 특성을 보이지만 재하 후 약간의 시간만 경과하여도 소산이 빠르게 발생되어 성토기간에 관계없이 거의 같은 값을 갖는다.

압밀도 곡선은 그림 11.(c)와 같이 성토기간이 클수록 압밀소요시간이 길어지는 특성을 보이고 있다. 이는 성토기간이 길수록 그 시간만큼 압밀이 늦게 시작되기 때문으로 전체 압밀완료 시간으로 보면 가능한 성토기간이 짧을수록 좋다.

성토기간별 수평배수층의 최대통수량은 그림 11.(d)와 같이 성토기간이 짧을수록 크고 성토기간이 길수록 적은

특성을 보이지만 재하후 약간의 시간만 경과하여도 통수량은 크게 감소하여 성토기간에 관계없이 거의 같은 값을 가지므로 통수능 부족에 의한 압밀지연은 각 단계의 성토직후만 발생되고 그 후에는 없음을 알 수 있다.

3.2 성토기간별 압밀지연 특성

성토기간별 수평배수층의 통수능을 고려한 압밀해석 결과 그림 12와 같이 90%압밀도에 도달하는 시간은 성토기간에 따른 차이는 미소하고 통수능에 따른 차이가 크다. 즉 같은 통수능에서 즉시성토와 성토기간이 100 일인 조건의 압밀곡선은 압밀초기에는 차이가 있으나 최종침하시간은 거의 같은 값을 보이고 있다.

또한 각 성토기간별 수평배수층의 통수능별 50%압밀도에 도달하는 시간을 보면 그림 13과 같이 어느 통수능 값 이상에서는 압밀시간이 일정하지만 이 값 이하에서는 크게 증가하는 특성을 보이며, 이 한계값이 모든 성토기간에 관계없이 일정한 것을 보면 성토기간은 소요통수능에 영향이 없을 알 수 있다.

여기서 소요통수능에 대하여 Giroud해와 본 해석결과를 비교하여 보면 그림 14와 같이 Giroud해는 성토기간에 따라 소요통수능 값의 차이가 크지만 본 해석결과는 성토기간에 관계없이 일정한 값을 보이고 있다.

이는 성토기간이 짧을수록 압밀초기에 배제시켜야 하는 통수량이 커서, 수평배수층내 발생하는 손실수두가 증가하지만, 지중에 발생하는 과잉간극수압도 성토기간에 반비례하여 커지기 때문에 손실수두비가 거의 같아 성토기간은 수평배수층의 소요통수능 값 결정에 큰 영향요소가 아니라는 것을 알 수 있다.

그러므로 성토기간에 크게 영향을 받는 Giroud의 제안식과 기존의 설계기준은 보완되어야 한다는 결론이다.

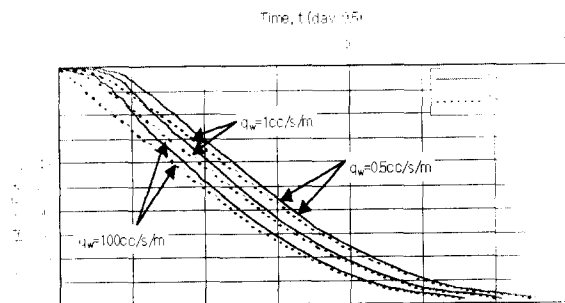


그림 12. 성토기간과 수평배수층의 통수능별 압밀곡선

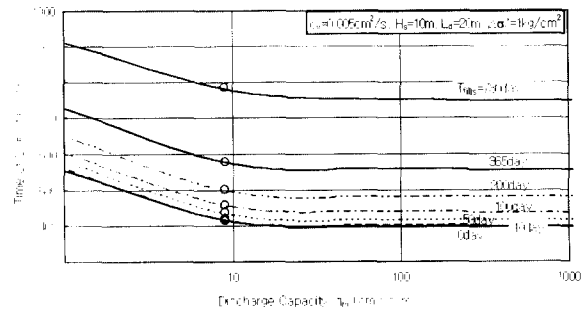


그림 13. 성토기간별 50%압밀도 도달시간 및 5%이내 압밀지연 소요통수능

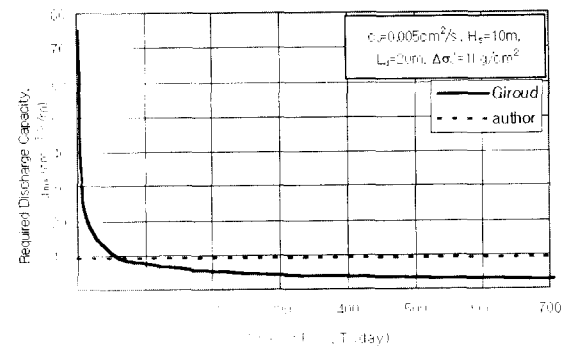


그림 14. Giroud해와 본 압밀해석결과 소요통수능 비교

4. 소요통수능 평가

4.1 소요통수능에 영향을 미치는 요소

4.1.1 압밀계수 및 수평배수층의 배수거리

흙의 압밀계수와 배수재의 길이별로 수평배수층의 통수능을 고려한 압밀해석을 실시한 결과 그림 15와 같이 어느 통수능 값 이상에서는 압밀도 50%에 도달시간에 차이가 없으나 이 값 이하에서는 압밀지연이 크게 발생하는 특성을 보이고 있다.

여기서 압밀도 50%를 기준으로 한 것은 연직배수공법을 적용하지 않고 선행압밀공법 만을 적용하는 경우에 일반적으로 50% 전후 정도의 압밀도에 도달한 후 선행하중을 제거하므로 50%압밀도를 기준으로 하였다.

본 논문에서는 압밀지연이 5%이내이면 허용할 수 있는 것으로 보고 압밀지연이 5% 범위내인 소요통수능값을 그림에 점으로 나타내었으며, 압밀지연을 발생시키지 않는 소요통수능은 수평배수거리의 제곱과 압밀계수에 비례하는 관계를 보이고 있다.

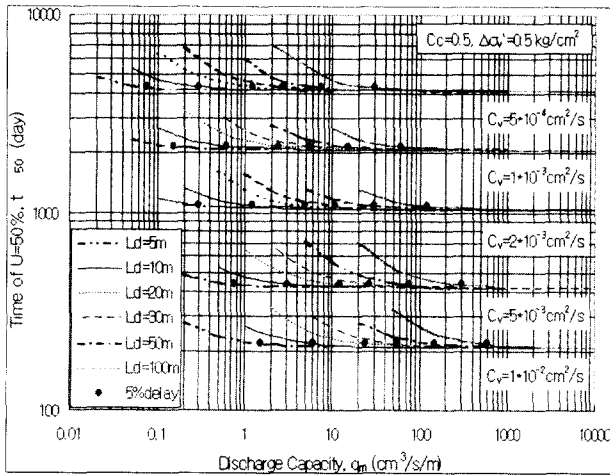


그림 15. 압밀계수와 배수거리별 압밀지연특성 및 5%이내 압밀지연 소요통수능

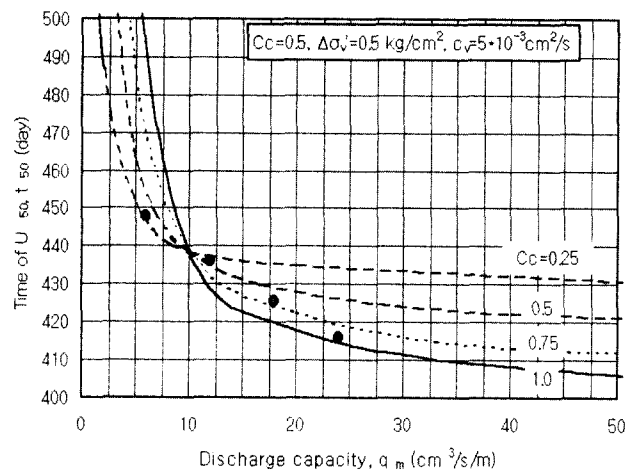
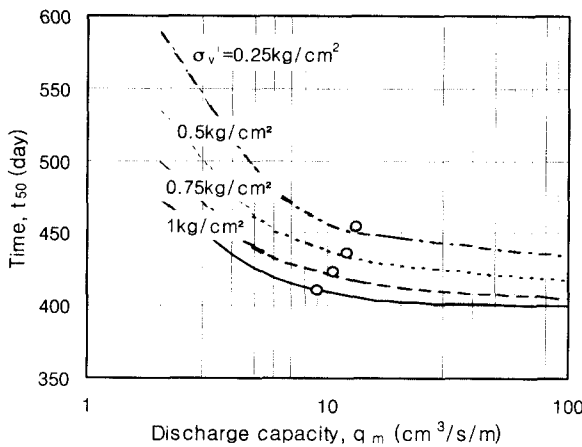
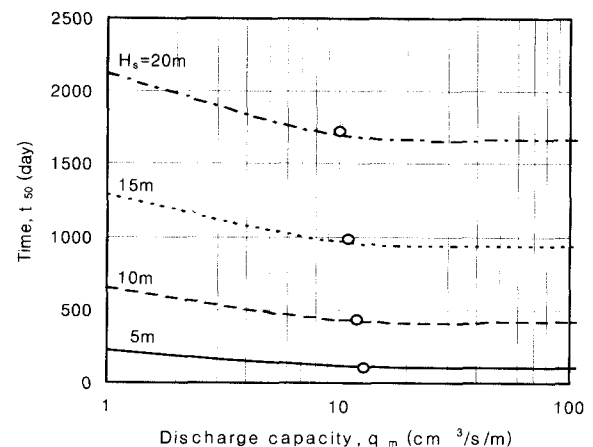


그림 16. 압축지수별 압밀지연특성 및 5%이내 압밀지연 소요통수능



(a) 상재증가하중



(b) 연약심도

그림 17. 상재증가하중 및 연약심도별 압밀지연특성 및 5%이내 압밀지연 소요통수능

4.1.2 압축지수의 영향

흙의 압축지수별로 수평배수층의 통수능을 고려한 압밀해석을 실시한 결과 그림 16과 같다. 압밀지연이 5% 범위내인 소요통수능값을 그림에 점으로 나타내었으며 압밀지연을 발생시키지 않는 소요통수능은 압축 지수에 비례하는 관계를 보이고 있다.

4.2 소요통수능에 영향이 적은 요소

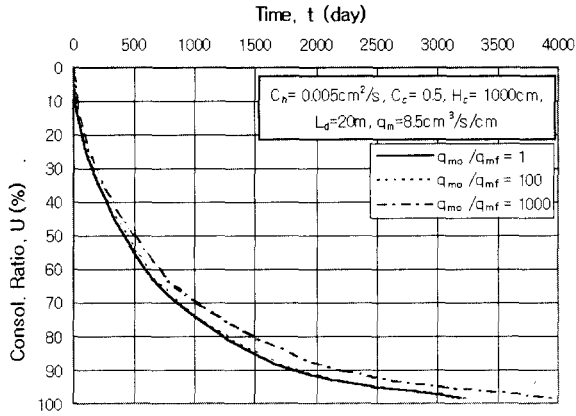
4.2.1 상재증가하중($\Delta \sigma_v$)과 연약심도(H_s)

상재증가하중 및 연약심도별 수평배수층의 통수능을 고려한 압밀해석을 실시한 결과 그림 17과 같이 압밀지연이 5% 범위내인 소요통수능값이 큰차이를 보이고 있지 않다. 즉 소요통수능 값의 결정에 상재증가하중과 연약심도의 영향은 실용적인 면에서 무시할 수 있다고 판단된다.

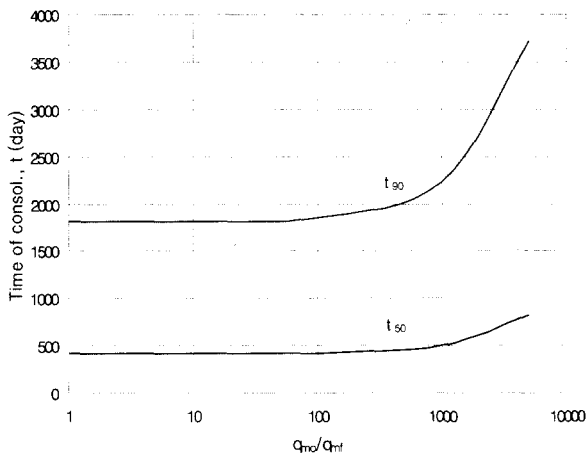
4.2.2 압밀진행동안 수평배수층의 통수능 감소영향

수평배수층의 통수능이 시간이 경과하면서 감소하는 경우 압밀지연에 미치는 영향을 분석하기 위하여 최종 침하량(s_f)에서의 통수능(q_{mf})이 초기통수능(q_{mo})의 1/10, 1/100, 1/1,000, 1/5,000로 감소하는 조건에 대하여 압밀해석을 하였다. 통수능의 감소속도는 지반의 침하량(S_f)에 비례하여 감소하는 것으로 보고, 즉 임의 시간 t 에서 $q_{mt} = q_{mo} / \{1 + (q_{mo}/q_{mf} - 1) \times S_t/S_f\}$ 의 관계식으로 통수능이 감소하는 것으로 보았다.

압밀해석결과 그림 18.(a)와 같이 배수재의 통수능이 압밀초기보다 압밀완료시점에서 1/1,000로 감소하는 경우는 압밀지연이 있으나, 1/100이내로 감소하는 경우의 압밀곡선은 거의 같은 곡선으로 압밀지연이 거의 없다. q_{mo}/q_{mf} 비별 압밀도 50% 및 90% 도달시간(t_{50} , t_{90})의



(a) 시간-압밀도 곡선



(b) 압밀소요시간변화

그림 18. 압밀진행동안 배수층의 통수능감소의 압밀지연 특성

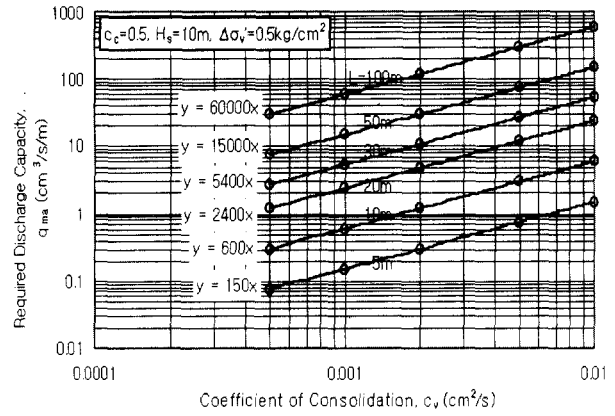
변화를 보면 그림 18.(b)와 같이 q_{mo}/q_{mf} 비가 클수록 t_{50} , t_{90} 이 증가하지만 q_{mo}/q_{mf} 비가 100일지라도 t_{50} , t_{90} 의 증가량은 2% 이내로 압밀진행동안 배수재의 통수능의 감소가 압밀지연에 미치는 영향은 매우 적으므로 q_{mo}/q_{mf} 비가 100이내이면 실용적인 면에서 무시할 수 있다.

4.3 소요통수능의 결정

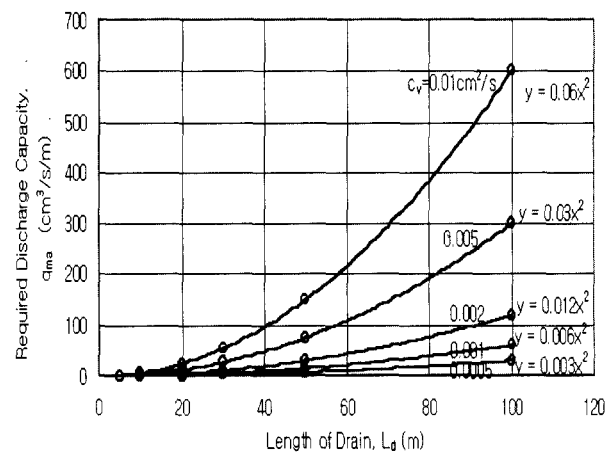
4.3.1 소요통수능결정시 고려요소

압밀지연을 발생시키지 않는 수평배수층의 소요통수능 값의 크기에 영향요소를 보면 흙의 압밀계수(c_v), 압축지수(C_c), 배수층의 배수거리(L_d), 통수능 감소비 q_{mo}/q_{mf} 및 상재증가하중($\Delta\sigma'_v$)이며 이들의 영향특성을 요약하면 표 2와 같다.

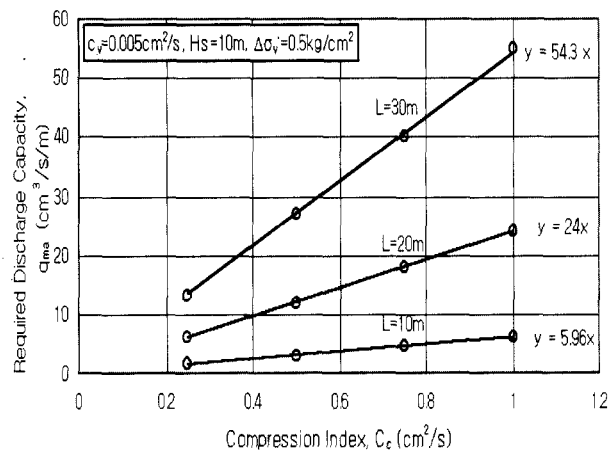
압밀지연을 일으키지 않는 수평배수층의 소요통수능은 흙의 압밀계수(c_v), 압축지수(C_c), 수평배수층 배수거리(L_d)의 제곱에 직선비례관계에 있음을 알 수 있다.



(a) 압밀계수와 소요통수능 관계



(b) 배수재 타설길이와 소요통수능관계



(c) 압축지수와 소요통수능관계

그림 19. 각 영향요소별 소요통수능관계

4.3.2 소요통수능의 결정

그림 15, 16으로부터 압밀지연 5%이내인 수평배수층의 소요통수능은 그림 19.(a)와 같이 압밀계수에 비례하

표 2. 수평배수층의 소요통수능(q_{ma})에 미치는 영향요소

영향요소	영향특성	영향관계
흙의 압밀계수(c _v)	c _v 증가하면 q _{ma} 증가	직선비례
압축지수(C _c)	C _c 증가하면 q _{ma} 증가	직선비례
배수층의 배수거리(L _d)	L _d 증가하면 q _{ma} 증가	제곱에 비례
통수능 감소비(Q _{mo} /Q _{mi})	Q _{mo} /Q _{mi} 증가하면 q _{ma} 증가	미소로 무시
상재증가하중(Δσ _v)	Δσ _v 증가하면 q _{ma} 감소	미소로 무시
연약지반심도(H _s)	H _s 증가하면 q _{ma} 감소	미소로 무시

고, 그림 19.(b)와 같이 배수길이의 제곱에 비례하며, 그림 19.(c)와 같이 압축지수에 비례하는 결과를 얻었다.

그 결과를 요약하면 표3과 같이 압밀계수(c_v), 배수거리(L_d)의 제곱 및 압축지수(C_c)에 직선비례관계로서 $q_{ma} = \alpha * (c_v * (L_d)^2 * C_c)$ 관계식으로 볼 수 있으며, 각 검토 조건의 α 값의 평균값은 12이다. 여기에 안전율(1.5)을 고려하여 α = 1.5 * 12 ≃ 18로 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$q_{ma} = 18 \times [c_v \times (L_d)^2 \times C_c] \quad (12)$$

여기서, q_{ma}: 배수재의 소요통수능(cm³/s/m)

C_c: 흙의 압축지수

c_v: 흙의 압밀계수(cm²/s)

L_d: 수평배수층의 배수거리(m) 이다.

표 3. 각 영향요소와 소요통수능관계

관계	C _c	L _d (m)	c _v (cm ² /s)	관계식	q _{ma} /{C _c *(L _d) ² *c _v }	비고
q _{ma} ~C _v	0.5	5		q _{ma} = 150C _v	12	그림19.(a)
	0.5	10		q _{ma} = 600C _v	12	
	0.5	20		q _{ma} = 2400C _v	12	
	0.5	30		q _{ma} = 5400C _v	12	
	0.5	50		q _{ma} = 15000C _v	12	
	0.5	100		q _{ma} = 60000C _v	12	
q _{ma} ~L	0.5		0.0005	q _{ma} = 0.003(L _d) ²	12	그림19.(b)
	0.5		0.001	q _{ma} = 0.006(L _d) ²	12	
	0.5		0.002	q _{ma} = 0.012(L _d) ²	12	
	0.5		0.005	q _{ma} = 0.03(L _d) ²	12	
	0.5		0.01	q _{ma} = 0.06(L _d) ²	12	
q _{ma} ~C _c		10	0.005	q _{ma} = 5.96C _c	11.92	그림19.(c)
		20	0.005	q _{ma} = 24C _c	12	
		30	0.005	q _{ma} = 54.3C _c	12.07	
평균					12	
[평균*안전율1.5=18]				$q_{ma} = 18 * C_c * (L_d)^2 * c_v$		

5. 결론

연약지반위에 수평배수층을 포설하고 그 위에 성토 시 압밀지연을 발생시키지 않는 수평배수층의 소요통수능을 평가하기 위하여, 수평배수층의 통수능을 고려한 압밀해석방법을 개발하고, 각 조건별 압밀해석을 통하여 수평배수층의 소요통수능을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Giroud(1981)가 제안한 수평배수층의 소요통수능 값은 성토기간(T)에 영향을 크게 받는 것으로 되어 있지만, 본 제안 압밀해석결과 성토속도가 빠른 만큼 지반에 발생하는 과잉간극수압과 배수재내 손실수두의 발생속도가 같아 성토기간에 관계없이 수두비가 같으므로 성토기간은 소요통수능 값에 영향이 거의 없는 것으로 분석되었다.
- (2) 압밀지연을 발생시키지 않기 위한 수평배수층의 소요통수능은 압밀계수(c_v), 압축지수(C_c)와 수평배수층의 배수거리(L_d)에 크게 영향을 받지만, 상재증가하중(Δσ_v)과 압밀대상 지반층의 두께(H_s)는 그 영향이 미소하여, 소요통수능 값의 결정에 그 영향을 무시할 수 있는 결과를 얻었다.
- (3) 성토 후 시간이 경과하면서 수평배수층의 통수능 감소특성은 그 감소비가 1/100로 감소할 지라도 압밀

지연은 2% 이내로 이 감소비가 1/100이내라면 통수능 감소의 영향은 실용적인 면에서 무시할 수 있는 결과를 얻었다.

- (4) 무처리 연약지반위에 성토시 수평배수층의 소요통수능은 지반토의 압밀계수(c_v , cm^2/s), 압축지수(C_c)와 수평배수층의 배수거리(L_d , m)의 제곱에 비례하며, 압밀지연 5%이내인 소요통수능은 안전율 1.5로 보고 $q_{ma} = 18 \times C_c \times c_v \times (L_d)^2$ ($\text{cm}^3/\text{s}/\text{m}$) 이상이면 되는 상관식을 얻었다.

본 연구결과는 수치해석에 의한 결과로서 실무에 적용할 수 있는 설계기준을 설정하기 위하여 앞으로 모형시험이나 시험시공등을 통한 기준정립의 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 1996~1999년도 농림기술개발연구과제 “간척지 연약지반토 성토재료 활용방안 연구”의 연구비 지원으로 수행된 연구로 연구비지원에 감사 드립니다.

참고 문헌

1. 김상규, 김현태, 홍병만(2000), “스미어존내 투수성변화를 고려한 연직 배수공법의 압밀해석”, 한국지반공학회지, 제16권, 제2호, pp.31~40.
2. 김상규, 김현태, 공길용(2001), “연직배수층의 소요통수능 평가”, 한국지반공학회지, 제17권, 제1호, pp.35~45.
3. 한국도로공사(1996), 도로설계실무편람, pp.198.
4. 한국도로공사(1998), 도로설계실무편람, pp.586.
5. E. H., Davis(1969), Rate of Settlement, Lectures on the analysis of the Settlement of foundations, Sydney University.
6. Giroud, J. P.(1981), “Designing with Geotextiles”, Matériaux et Constructions, Vol.14, No.82, pp.257~277.
7. Lancellotta, Renato(1995), Geotechnical Engineering, A.A.Balkema, pp.123~124.

(접수일자 2001. 6. 7)