

연직배수공법에서 수평배수층의 소요통수능

Required Discharge Capacity for Horizontal Drains Installed with Vertical Drains

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 sometimes installed on the ground together with vertical drains in order to drain excess pore water. Taking into account the discharge capacity of horizontal drains, a new analytical method is developed in this paper, and then a new formula for the discharge capacity of horizontal drains is proposed. It is known from the analysis that the effect of the rate of surcharge loading is negligible in determining horizontal discharge capacity. This formula is described as the function of coefficient of consolidation, space of vertical drain, compression index, length of horizontal drains, and thickness of the compressible layer.

요 지

연직배수공법에서 과잉간극수를 배제하기 위해 연직배수재와 함께 수평배수층이 지반 위에 설치된다. 이 논문에서는 수평배수층의 통수능을 고려한 압밀해석 방법을 개발하고 수평배수층의 소요통수능을 결정하는 공식을 제안하였다. 이 해석으로부터 성토하중의 재하속도의 영향은 매우 적다는 것을 알게 되었다. 이 공식에서는 압밀계수, 연직배수재의 타설간격, 수평배수층의 배수거리, 압축지수 및 압밀침하 대상층의 두께의 함수로 소요통수능의 결정이 가능하다.

Keywords : Discharge capacity, Horizontal drain, Vertical drain

1. 서 론

연직배수공법에서 연직배수재로부터 배출되는 물을 원활히 배제하기 위하여 지표면에 모래, 토목섬유 등으로 수평배수층을 형성하고 그 위에 성토를 한다. 이때 이 배수층의 통수능은 압밀지연이 발생되지 않도록 충분히 커야한다.

각 기관(예, 한국도로공사(1996))의 설계기준을 보면 수평배수층의 소요통수능은 성토기간에 영향을 너무 크게 받는다. 이는 성토기간이 짧으면 압밀초기에 배제

하여야 하는 물의 양이 그만큼 크기 때문이다. 그러나 압밀초기에는 지반으로부터 압밀배수되는 물이 많아 압밀지연이 발생될지라도, 시간이 조금만 경과하면 이 배수량이 크게 감소하여 압밀지연이 발생되지 않게 된다. 즉 압밀초기의 많은 물을 통수시킬 수 있는 통수능을 소요통수능으로 결정하기 보다는 전체 압밀기간으로 볼 때 압밀지연이 허용범위에 있는 수평배수층의 한계통수능을 소요통수능으로 결정하는 것이 타당하다.

Yoshikuni(1979)은 수평배수층과 연직배수재의 통수능을 동시에 고려하는 연직배수공법에 대한 압밀해

*1 정희원, 농업기반공사 농어촌연구원 수석연구원 (Member, Research Fellow, Rural Research Institute, htkim@karico.co.kr)

*2 정희원, 동부산대 학장 (Member, Visiting Prof., Saga Univ.)

*3 정희원, 농업기반공사 농어촌연구원 주임연구원 (Member, Senior Researcher, RRI.)

석방법을 제안하였는데 이 해석에서는 성토기간을 고려하지 않고 있다. 즉 각 기관의 설계기준이 성토기간에 크게 영향을 받는데 이에 대한 확인이 이 제안식만으로는 어렵다.

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

2. 수평배수층의 통수능을 고려한 연직배수공법의 압밀해석방법

2.1 기존 소요통수능 기준 검토

2.1.1 한국도로공사 설계기준

한국도로공사(1998)의 수평배수층(Sand Mat)에 대한 소요통수능 기준을 보면 성토기간동안의 평균 동수구배가 수평배수층내 자유수면을 갖는 조건, 즉 위치수두만 존재하고 압력수두가 발생되지 않는 조건으로 식 (1)와 같다.

$$\Delta H_w = \frac{L^2 \cdot S}{2 \cdot K \cdot H} \quad (1)$$

여기서, K : 모래의 투수계수(cm/day)

S : 성토시공기간동안의 평균침하속도(cm/day)

L : 수평배수층의 배수거리(m)

H : 수평배수층(Sand Mat)의 두께(cm)

ΔH_w : 수평배수층내의 압력수두로, $\Delta H_w \leq H$ 인

H 를 결정하면 된다.

여기서 성토기간동안 수평배수층내에 평균압력수두(ΔH_w)가 수평배수층의 두께(H)보다 적으면 압밀지연이 없다는 가정이다. 식 (1)의 기준으로부터 소요통수량을 유도하면 식 (2)와 같다.

$$a_m = K \cdot H = \frac{L^2 \cdot S}{2 \cdot \Delta H_w} \geq \frac{L^2 \cdot S}{2 \cdot H} = \frac{L^2 \cdot \frac{S_{fill}}{T_{fill}}}{2 \cdot H} \quad (2)$$

여기서, S_{fill} : 성토기간동안의 침하량(cm), T_{fill} : 성토기간(day)이다.

실례로서 $D=113\text{cm}$, $d_w=5\text{cm}$, $c_v=0.0005\text{cm}^2/\text{s}$, $H_s=20\text{m}$, $L_d=30\text{m}$ 이고 스미어의 영향이 없는 가정 조건에 대하여 식 (2)로 소요통수능을 구한 결과 그림 2와 같이 성토기간과 배수거리에 크게 영향을 받는다.

여기서 성토기간동안의 침하량은 연직배수공법에 대한 Hansbo(1981) 또는 Onoue(1988)의 제안식을 사용하였으며, S_{fill} 은 Terzaghi(1943)가 제안한 점중하중시의 침하량계산방법에 의해 즉시 성토 후 $T_{fill}/2$ 기간동안의 침하량을 적용하였다.

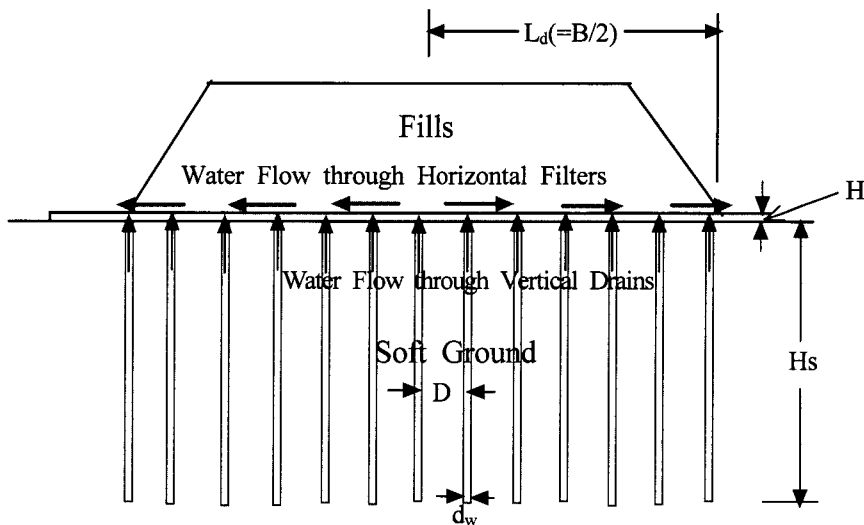


그림 1. 연직배수공법에서 수평배수층의 통수능 계산 모형도

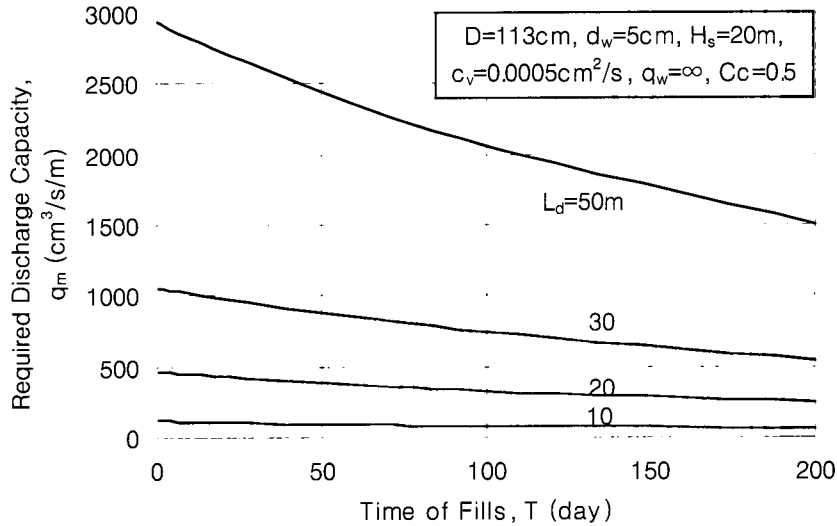


그림 2. 한국도로공사 설계기준에 의한 성토속도별 소요통수능(예)

2.1.2 Yoshikuni(1979) 제안 압밀해석방법

Yoshikuni(1979)은 수평배수층과 연직배수재의 통수능을 동시에 고려하는 연직배수공법에 대하여 식 (3)와 같은 압밀해석방법을 제안하였다.

$$U_h = 1 - \exp[-8T_h / (F(n) + 0.8L)] \quad (3)$$

여기서,

$$F(n) = \frac{(n)^2}{(n)^2 - 1} \ln(n) - \frac{3(n)^2 - 1}{4(n)^2}$$

$$L = \frac{32}{\pi^2} \left[\frac{k_h}{k_w} \left(\frac{H_s}{d_w} \right)^2 + \frac{H_s \cdot k_h}{n^2 \cdot H_m \cdot k_m} \left(\frac{L_d}{d_w} \right)^2 \right]$$

$n (= d_e / d_w)$: 간격비

$$T_h (= \frac{c_h t}{d_e^2}): \text{수평방향 시간계수}$$

t : 압밀소요시간

c_h : 흙의 수평방향 압밀계수

d_e : 영향원의 직경 1.13 S(정사각형배치),
1.05 S(삼각형배치)

d_w : 수직배수재의 환산직경

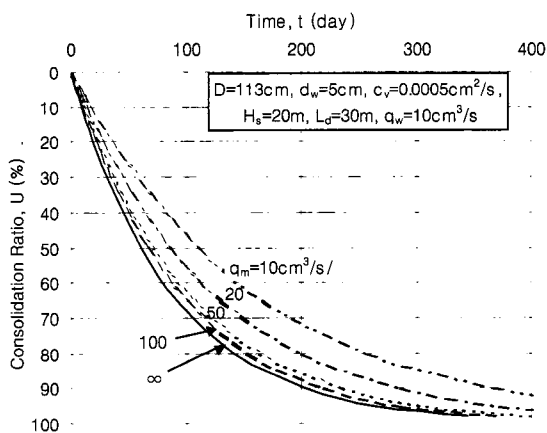
H_s : 점토층의 두께

H_m : 수평배수층의 두께

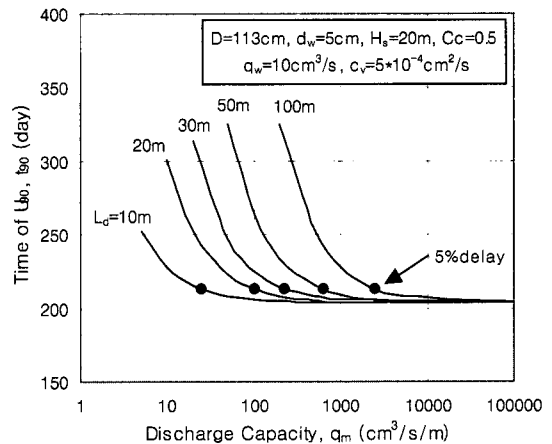
k_w : 연직배수재의 투수계수

k_m : 수평배수층의 투수계수

L : 배수저항계수이다.



(a) 압밀도



(b) 수평배수층의 통수능별 90%압밀시간

그림 3. Yoshikuni(1979)의 수평배수층의 통수능을 고려한 압밀해석

S=100cm, $d_w=5\text{cm}$, $c_v=0.0005\text{cm}^2/\text{s}$, $H_s=20\text{m}$, $L_d=30\text{m}$, $q_w=10\text{cm}^3/\text{s}$ 이고, 흙의 수평방향투수계수는 $k_v \approx \frac{0.434 C_c c_v}{(1+e_o) \sigma_v'}$ 의 압밀계수일정 조건(김, 2000)에서 수직방향과 수평방향의 투수계수와 압밀계수관계가 같다고 가정하고 스미어의 영향은 고려하지 않은 $k_h \approx \frac{0.434 C_c c_h}{(1+e_o) \sigma_v'}$ 인 조건에 대한 수평배수층의 통수능별 시간-압밀도를 식 (3)으로 구하면 그림 3(a)와 같으며, 여기서 통수능별 압밀도 90%도달시간(t_{90})을 나타내면 그림 3(b)와 같이 어느 통수능 이상에서는 t_{90} 이 거의 동일하지만 이 값 이하에서는 t_{90} 이 크게 증가하는 특성을 보이고 있다.

즉 이 통수능이상의 수평배수층을 사용한다면 통수능부족에 의한 압밀지연을 방지할 수 있다는 것을 알 수 있다.

2.1.3 Yoshikuni(1979)제안 및 기존 설계기준 비교

Yoshikuni(1979)제안 압밀해석방법으로 압밀지연 5% 범위내의 수평배수층의 통수능은 한국도로공사 설계기준과 같이 수평배수층의 배수거리의 제곱에 비례하는 관계를 보이고 있다. 그러나 그 소요통수능 값은 표 1과 같이 그 차이가 너무 크다. 이 차이의 원인은 도로공사 기준은 수평배수층내 압력이 발생되지 않는 조건의 통수능이나 Yoshikuni(1979)의 해는 압밀초기에 어느 정도 압밀지연이 발생될지라도 전체 압밀기간으로 볼 때 허용(5%이내)할 수 있는 통수능을 결정한 것으로 도로공사기준은 너무 과다하고, Yoshikuni(1979)의 해에 의한 통수능 값이 타당하다고 볼 수 있다.

그러나 Yoshikuni(1979)의 해는 성토시공기간을 고려할 수 없으므로 성토기간이 소요통수능 값에 미치는 영향을 알 수 없다. 그러므로 성토기간과 수평배수층의 통수능을 함께 고려할 수 있는 압밀해석방법의 개발이 우선 필요하고, 각 영향요소를 고려하여 수평배수층의 소요통수능을 결정하는 기준의 정립이 필요하다.

2.2 수평배수층의 통수능을 고려한 연직배수공법의 압밀해석방법 전개

2.2.1 가정조건

- 1) 기초지반과 배수층내 물의 흐름은 Darcy의 법칙이 적용된다.
- 2) 흙의 유효응력과 간극비관계는 정규압밀영역에 대하여 유효응력의 크기에 관계없이 압축지수 일정 조건을 적용하였다.
- 3) 흙의 $\sigma_v'-k_h$ 관계는 압밀계수일정으로 보고 식 (3)과 같은 관계식으로 투수계수가 유효응력에 따라 변화되는 상관식을 적용하였다.(김, 2000)

$$k_h \approx \frac{0.434 C_c c_h}{(1+e_o) \sigma_v'} \quad (4)$$

- 4) 수평배수층위에 성토재료는 불투수층이다.
- 5) 각 배수층은 포화되어 있다.
- 6) 수평배수층내 물의 흐름은 수평방향의 일방향 흐름이다.

2.2.2 해석이론 및 해석방법 전개

연약지반위에 연직배수재와 수평배수층을 포설하고 그 위에 성토시 그림 1과 같이 기초지반으로부터 수평방향으로 압밀배수되는 과잉간극수가 연직배수재와 수평배수층을 통하여 배제되는 조건에 대한 압밀해석방법을 유도하기 위하여 1) 기초지반내에 수평방향의 흐름(김, 2000)과 2) 수평방향으로 압밀배수된 물이 연직배수재(김, 2001)와 수평배수층(김, 2001)을 통하여 배제되는 과정으로 나누어 생각해 보자.

1) 기초지반내에 수평방향 압밀배수 과정

수평방향흐름에 의한 압밀해석방법을 유도하기 위하여 수평방향의 흐름만을 고려하여 그림 4(a)와 같이 유한요소계로 나누어 생각해 보자.

수평방향 배수에서 반지름 r_1 원주를 통과하는 투수량은 다음 식과 같다.

표 1. 한국도로공사기준과 Yoshikuni(1979)해에 의한 수평배수층의 소요통수능 비교

수평배수거리(L_d , m)		10	20	30	50	100
소요통수능, q_m ($\text{cm}^3/\text{s}/\text{m}$)	도로공사기준	117	469	1,055	2,931	11,725
	Yoshikuni 해	25	100	225	625	2,500
검토조건		D=113cm, $d_w=5\text{cm}$, $H_s=20\text{m}$, $C_c=0.5$, $q_w=\infty$, $c_v=0.0005\text{cm}^2/\text{s}$				

$$\Delta q_i = -\frac{k_{hi}}{\gamma_w} \frac{\Delta u}{\Delta r} 2\pi r_i L_i \Delta t \quad (5)$$

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

$$k_h = \frac{0.434 C_c c_h}{(1 + e_o) \sigma_v'} \quad (6)$$

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

$$\epsilon_{v(r=i)} = \frac{q_i - q_{(i+1)}}{A_{i(i=0)} \cdot L_{i0}} \quad (7)$$

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

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

$$\Delta e_{(r=i)} = \epsilon_{v(r=i)}(1 + e_o) \quad (8)$$

여기서

$\Delta e = \frac{C_c}{1 + e_o} \cdot \log \frac{\sigma_{v_{i+1}}'}{\sigma_{v_i}'}$ 의 식으로부터 t_{j+1} 에서 i요소의 유효응력 $\sigma_{v_{i,j+1}}'$ 은 다음식으로 구하고

$$\sigma_{v_{i,j+1}}' = 10^{\left[\frac{\Delta e(1 + e_o)}{C_c} + \log \sigma_{v_i}' \right]} \quad (9)$$

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

$$\Delta u_{i(i,j)} = \sigma_{v_{i,j+1}}' - \sigma_{v_i}' \quad (10)$$

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.

이 과정에서 Δt 동안에 배수재로 흘러들어가는 물의 양을 알 수 있으며 이 물을 연직 및 수평배수재가 배수시키기 위하여 필요한 배수재내에 수압이 존재하고 이 수압만큼 흠으로부터 배수재로 흘러들어오는 물의 양이 적

어지게 된다. 그러므로 배수재의 통수능이 적으면 배수재내의 수압이 그 만큼 크게되어 압밀지연이 발생된다.

2) 연직배수재내 및 수평배수층내 물의 흐름해석

일면배수조건의 연직배수재내의 물의 흐름은 그림 4(b)와 같이 직경 d_c 의 원통형흠에서 배수재로 흘러들어 오는 물이 상부배수층으로 흐르므로 배수재를 흐르는 물의 양은 하층부는 적고 상층부가 가장 크다.

또한 연직배수재를 통하여 수평배수층으로 흘러들어 오는 물도 그림 4(c)와 같이 수평배수층의 중앙에서 가장 적고 외측에서 가장 크다.

그림 4(b)에서 i열의 연직배수재내 i층에서 흐르는 물의 양 Q_{vii} 는 배수재 주위 흠으로부터 압밀배수되는 양 q_{ri} 의 합으로서 이를 식으로 나타내면 식 (11)과 같다.

$$Q_{vii} = \frac{q_{rii}}{2} + q_{ri(i+1)} + \dots + q_{ri(n-1)} + q_{rim} \quad (11)$$

또한 그림 4(c)에서 수평배수층내 i열에서 흐르는 물의 양 Q_{hi} 는 수평배수층 중앙부부터 i열 위치까지 연직배수재로부터 흘러나오는 수량 $Q_{vii} \sim Q_{vni}$ 의 합으로서 이를 식으로 나타내면 식 (12)와 같다.

$$Q_{hi} = \frac{Q_{vii}}{2} + Q_{v(i+1)i} + \dots + Q_{v(n-1)i} + Q_{vni} \quad (12)$$

배수재내에 물의 흐름에 대하여 Darcy의 법칙을 적용한 배수재의 통수량은 $Q = k_i A = k \frac{\Delta h}{L} A$ 이다. 여기서 연직배수재의 소요통수능 $q_w = k_w A$ 과 수평배수층의 소요통수능 $q_m = k_m A$ 을 대입하면 $Q_v = q_w \frac{\Delta h_v}{L_v}$ 또는 $Q_h = q_m \frac{\Delta h_h}{L_h}$ 이므로 각층의 소요배수량을 통수시키기 위하여 요구되는 i열 연직배수재내 i층의 손실수두 Δh_{vii} 와 수평배수층내 i열의 Δh_{hi} 를 계산하면 다음과 같다.

$$\Delta h_{vii} = \frac{Q_{vii}}{q_{wii}} \cdot L_{vii} \quad (13)$$

$$\Delta h_{hi} = \frac{Q_{hi}}{q_{mi}} \cdot L_{hi}$$

여기서 q_{wii} : i열 연직배수재 i층 위치의 통수능

q_{mi} : 수평배수층 i열 위치의 통수능

L_{vii} : i열 연직배수재 i층의 길이

L_{hi} : 수평배수층 i열의 길이

i열 연직배수재내 각층 중앙의 정수압을 제외한 과잉 수압 p_{vii} 와 수평배수층내 i열의 p_{hi} 는 다음과 같다.

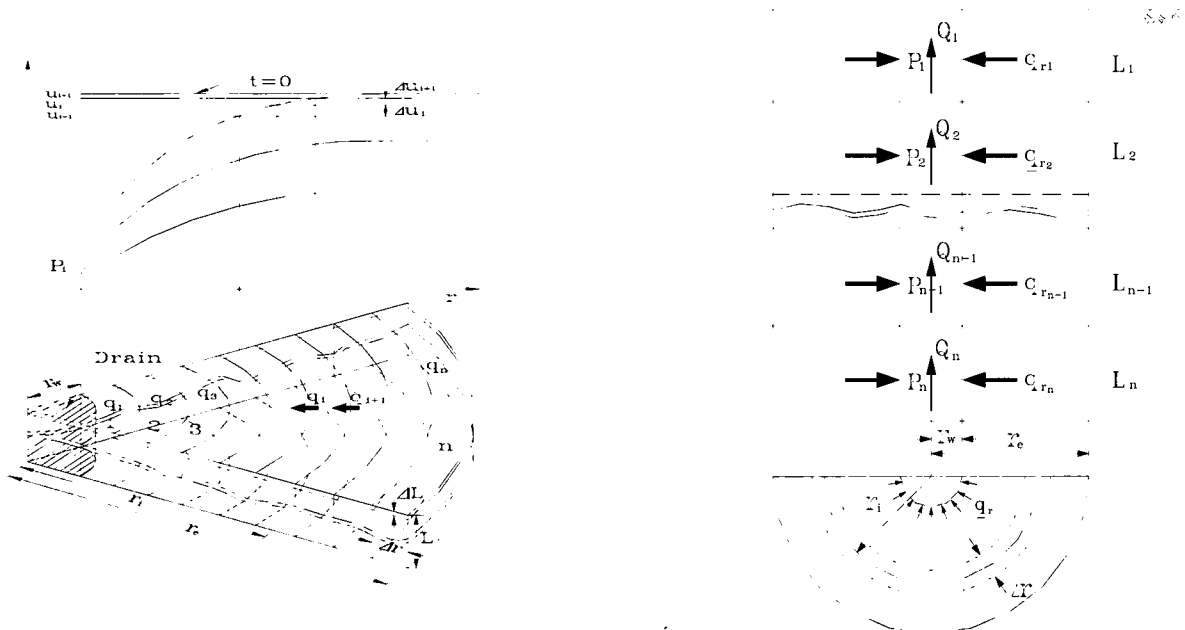
$$p_{hi} = (\Delta h_{h1} + \Delta h_{h2} + \dots + \Delta h_{h(i-1)} + \frac{\Delta h_{hi}}{2}) \gamma_w \quad (14)$$

$$p_{vii} = p_{hi} + (\Delta h_{vi1} + \Delta h_{vi2} + \dots + \Delta h_{vi(i-1)} + \frac{\Delta h_{vii}}{2}) \gamma_w$$

연직배수재와 수평배수층의 통수량 Q_i 를 통과시키기

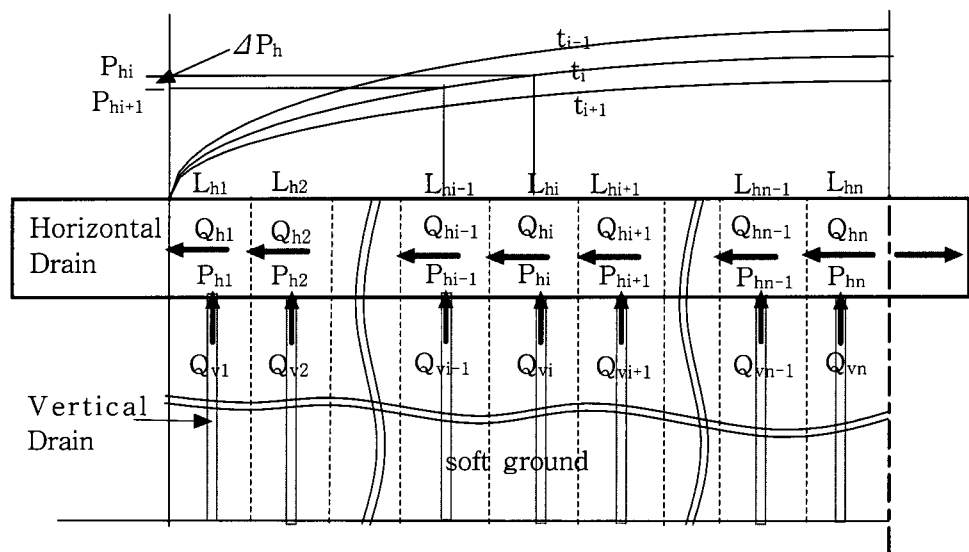
위하여 배수재내에 과잉수압 p_i 가 필요하게 된다. 즉 통수능이 충분히 커서 웰저항이 없다면 $p_i \approx 0$ 이 되어 흙의 압밀속도에 영향을 미치지 않겠지만 통수능이 적어서 p_i 가 크다면 흙속에 형성되는 수두경사가 p_i 값 만큼 감소하여 압밀이 지연되게 될 것이다.

즉 p_i 가 크면 q_{ri} 는 감소하고 Q_i 는 증가하게 된다. 즉 Q_i 와 q_{ri} 가 평형을 유지하는 p_i 조건으로 흙과 연직배수재 및 수평배수층에서 물이 흐르는 것이므로, 압밀시작부터 Δt 시간 간격으로 임의 시간에 Δt 동안 Q_i 와 q_{ri} 가 평형을 유지하는 p_i 을 시산법으로 구하여 배수재내에



(a) 수평방향배수압밀

(b) 연직방향배수



(c) 수평배수층내 배수

그림 4. 연직 및 수평배수층의 통수능을 고려한 압밀해석 모식도

수두 p_i 가 있는 조건으로 Δt 동안의 배수량과 압밀침하량을 계산하는 과정을 계속하면 수평배수층의 통수능을 고려한 연직배수공법의 압밀해석이 수행된다.

2.3 실예에 의한 해석방법의 검증

1) 입력자료

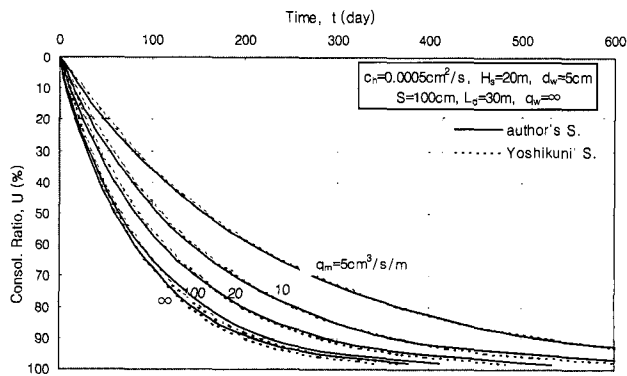
압밀해석에 사용한 기초지반조건 및 토질정수는 표 2와 같은 조건에 대하여 실시하였다. 본 해석방법을 검증하기 위하여 투수계수변화를 Terzaghi의 압밀계수 일정조건을 만족시키는 식 (4)와 같이 변화하는 조건에 대하여 본 제안해석과 Yoshikuni(1979)제안 압밀해석결과를 비교하였다. 여기서 성토는 일시성토조건으로 검토하였다.

2) 압밀해석결과 비교

표 2 조건에 대하여 Yoshikuni(1979)해와 본 제안 압밀해석결과 시간-압밀도곡선은 그림 5(a)와 같이 잘 일치하는 결과를 보이고 있다. 압밀계수 및 수평배수층의 배수거리별 압밀도 90%도달시간을 해석한 결과 그림 5(b)와 같이 두 해석방법이 잘 일치한다.

표 2. 프로그램 검증을 위한 기초지반조건 (예)

구 분	토질정수값
초기 유효응력 (σ_{vo})	0.74 kg/cm ²
상재증가 유효응력 ($\Delta \sigma_v'$)	1 kg/cm ²
초기간극비(e_0)	1.23
압축지수(C_c)	0.5
압밀계수(C_v)	5×10^{-3} cm ² /s
연약지반심도	20 m



(a) 시간-압밀도 곡선

3. 성토기간을 고려한 압밀해석과 소요통수능

3.1 성토기간을 고려한 압밀해석

성토기간을 그림 6(a)와 같이 즉시(0일), 10, 50, 100, 200, 365, 730일간 성토하는 조건으로 각 성토단계하중 $\Delta \sigma_v' = 0.2 \text{ kg/cm}^2$ 의 하중이 5단계로 성토되는 것으로 계산하였다.

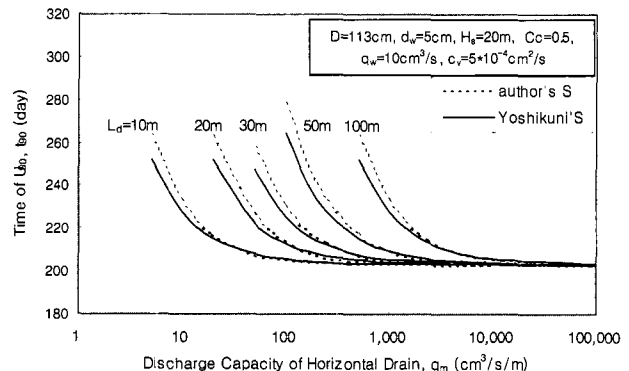
성토기간별 지중에 평균과잉간극수압의 발생 및 소산은 그림 6(b)와 같이 성토기간이 짧을수록 크게 발생하고 성토기간이 길수록 적은 특성을 보이지만 재하 후 약간의 시간만 경과하여도 소산이 크게 발생되어 성토기간에 관계없이 거의 같은 값을 갖는다.

압밀도 곡선은 그림 6(c)와 같이 성토기간이 클수록 압밀소요시간이 길어지는 특성을 보이고 있다. 이는 성토기간이 길수록 소요압밀도에 도달하는 시간이 길어지므로 가능한 성토기간이 짧을수록 좋다는 것을 알 수 있다.

3.2 성토기간별 압밀지연 특성

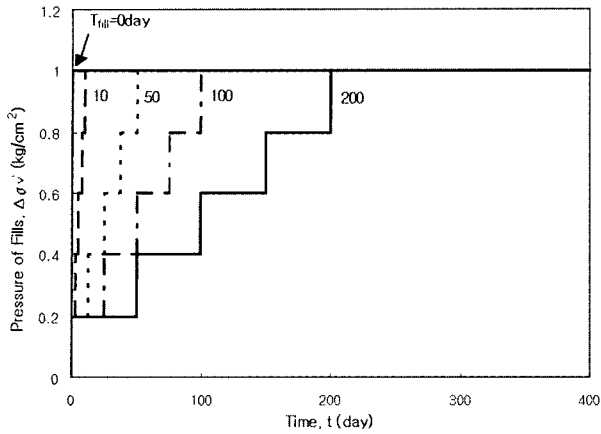
성토기간별 수평배수층의 통수능을 고려한 압밀해석 결과 그림 7과 같이 90%압밀도에 도달하는 시간은 성토기간에 따른 차이는 미소하고 통수능에 따른 차이가 크다. 즉 수평배수층의 같은 통수능에서 즉시성토와 성토기간별 압밀곡선은 압밀초기에는 차이가 있으나 최종침하시간은 거의 같은 값을 보이고 있다.

또한 각 성토기간별 수평배수층의 통수능별 90% 압밀도에 도달하는 시간을 보면, 그림 8과 같이 어느 통수능값 이상에서는 소요압밀시간이 거의 같지만, 이 값이

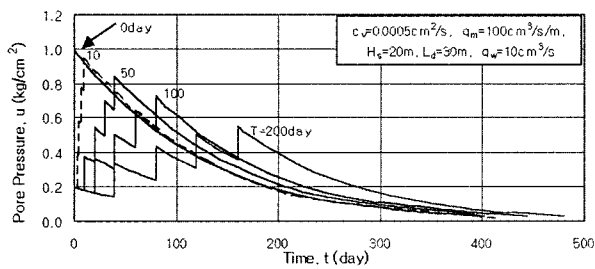


(b) 수평배수층의 통수능별 90% 압밀시간 비교

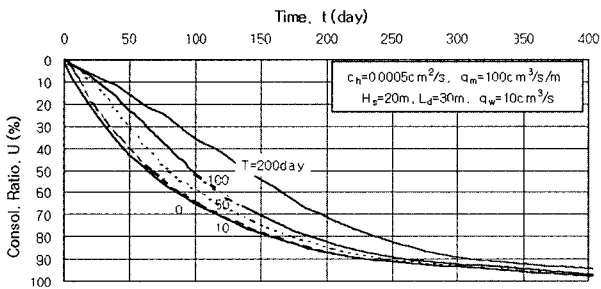
그림 5. 본 연구 제안 압밀해석과 Yoshikuni(1979) 해석결과 비교



(a) 성토기간



(b) 과잉간극수압 발생 및 소산특성



(c) 압밀도곡선

그림 6. 성토기간(T)별 압밀특성변화

하에서는 크게 증가하는 특성을 보이므로 이 값을 소요 통수능으로 결정하는 것이 타당할 것이다.

여기서 소요통수능에 대하여 도공기준과 본 해석결과를 비교하여 보면 그림 9와 같이 도공기준이 본 해석의 소요통수능 값보다 3~5배 정도 크다. 그 원인을 보면 도공기준은 수평배수층내에 성토기간동안의 평균압력수두(ΔH_w)가 수평배수층의 두께(H)보다 적으면 압밀지연이 없다는 가정조건으로 배수층내 과잉수압을 발생시키지 않는 통수능을 소요통수능으로 결정한 것이고, 본 해석에서는 배수층내 과잉수압이 발생되지만 압밀지연이 5% 이내인 조건의 통수능을 결정하였기 때문이다.

또한 그림 9에서 도공기준은 성토기간의 크기에 따라 소요통수능 값의 차이가 크지만, 본 제안 해석결과는 성

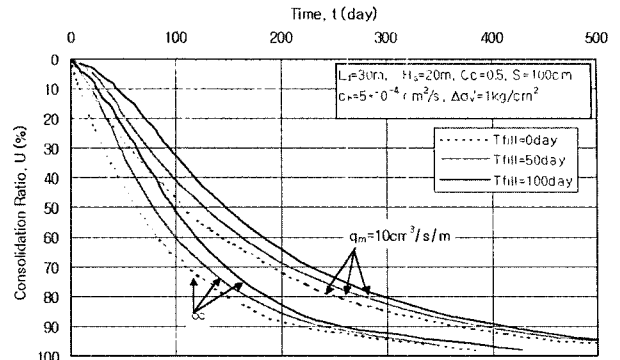


그림 7. 성토기간과 수평배수층의 통수능별 압밀곡선

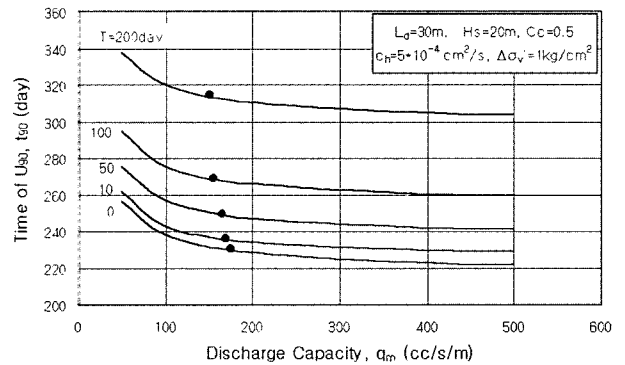


그림 8. 성토속도별 90% 압밀도 도달시간 및 5% 이내 압밀지연 소요 통수능

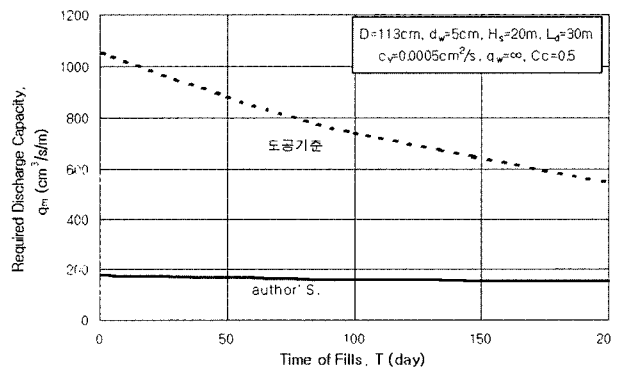


그림 9. 성토기간별 소요통수능변화 비교

토기간에 따른 영향이 매우 적음을 보이고 있다. 이는 성토기간이 짧을수록 압밀초기에 통수량이 크고 이 통수량을 통과시키기 위하여 필요한 수평배수층내 손실수두도 크지만, 흩에 발생하는 과잉간극수압도 성토기간이 짧을수록 크기 때문에 이 과잉간극수압에 대한 손실수두의 비가 같아져 성토기간의 크기는 압밀지연에 큰 영향요소가 되지 않는다는 것을 알 수 있다.

그러므로 소요통수능이 크게 산출되고, 성토기간에 크게 영향을 받는 기존의 기준은 보완되어야 한다는 결과를 얻었다.

4. 소요통수능 평가

4.1 소요통수능에 영향을 미치는 요소

4.1.1 압밀계수 및 수평배수층의 배수거리

흙의 압밀계수와 수평배수층의 배수거리별로 수평배수층의 통수능을 고려한 압밀해석을 실시한 결과 그림 10과 같이 어느 통수능값 이상에서는 압밀도 90%에 도달시간에 차이가 거의 없으나 이 값 이하에서는 압밀지연이 크게 발생하는 특성을 보이고 있다.

압밀지연이 5% 범위내인 소요통수능값을 그림에 점으로 나타내었으며 압밀지연을 발생시키지 않는 소요통수능은 수평배수거리의 제곱과 압밀계수에 비례하는 관계를 보이고 있다.

4.1.2 연직배수재 타설간격의 영향

연직배수재 타설간격별로 수평배수층의 통수능을 고려한 압밀해석을 실시한 결과는 그림 11과 같다. 압밀지연이 5% 범위내인 소요통수능값을 그림에 점으로 나타내었으며 압밀지연을 발생시키지 않는 소요통수능은 타설간격의 제곱에 비례하는 관계를 보이고 있다.

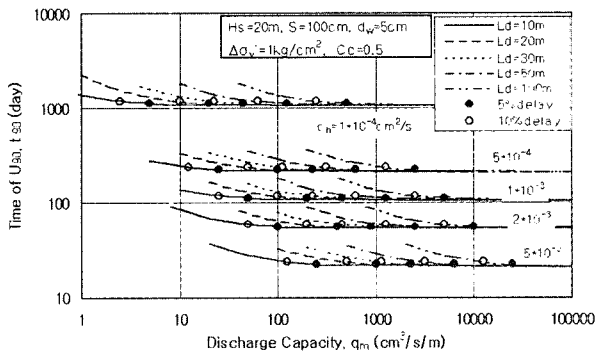


그림 10. 압밀계수와 배수거리별 압밀지연특성 및 압밀지연 5% 이내 소요통수능

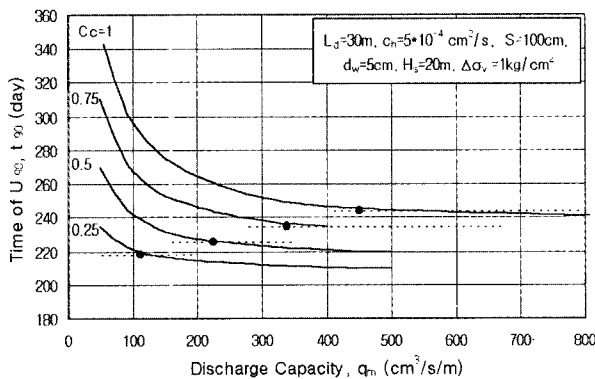


그림 12. 압축지수별 압밀지연특성 및 압밀지연 5%이내 소요통수능

4.1.3 압축지수의 영향

흙의 압축지수별로 수평배수층의 통수능을 고려한 압밀해석을 실시한 결과 그림 12와 같다. 압밀지연이 5% 범위내인 소요통수능값을 그림에 점으로 나타내었으며 압밀지연을 발생시키지 않는 소요통수능은 압축지수에 비례하는 관계를 보이고 있다.

4.1.4 연약지반 심도(Hs)

연약지반 심도별 수평배수층의 통수능을 고려한 압밀해석을 실시한 결과 그림 13과 같이 압밀지연이 5% 범위내인 소요통수능 값이 큰 차이를 보이고 있다. 즉 연직배수재가 없는 무처리 조건의 수평배수층의 소요통수능에 연약지반 심도의 영향이 거의 없지만(김, 2001), 연직배수공법에서는 연약지반 심도의 영향이 크므로 수평배수층의 소요통수능 값의 결정에 이 영향을 고려하여야 하는 결과를 얻었다.

4.2 소요통수능에 영향이 적은 요소

4.2.1 상재증가하중(Δσv')

상재증가하중별 수평배수층의 통수능을 고려한 압밀

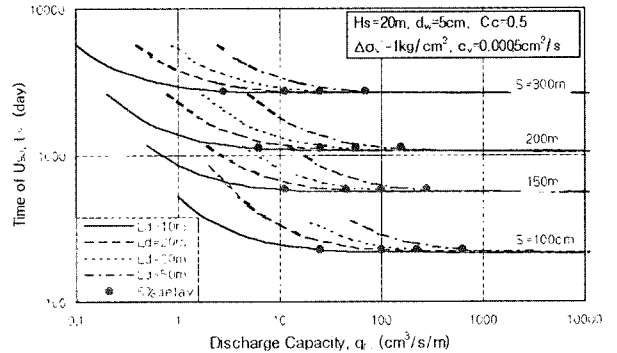


그림 11. 배수재타설간격별 압밀지연특성 및 5%이내 압밀지연 소요통수능

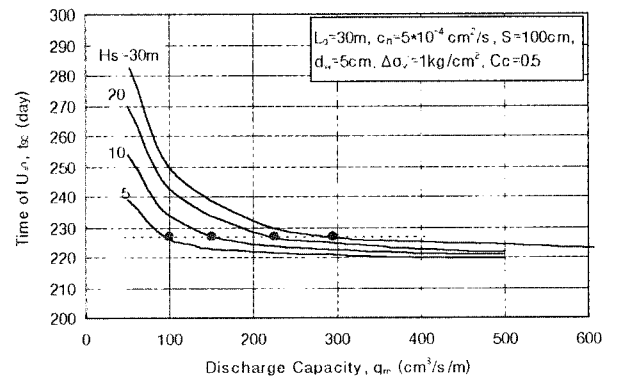


그림 13. 연약지반 심도별 압밀지연특성 및 5%이내 압밀지연 소요통수능

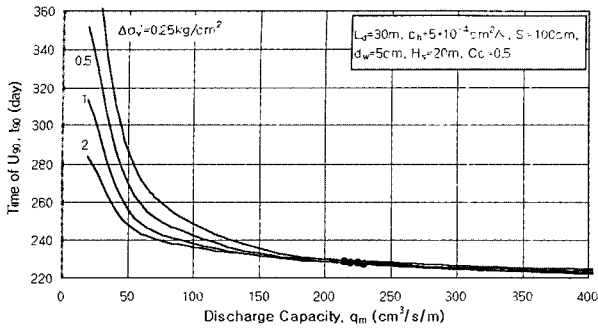
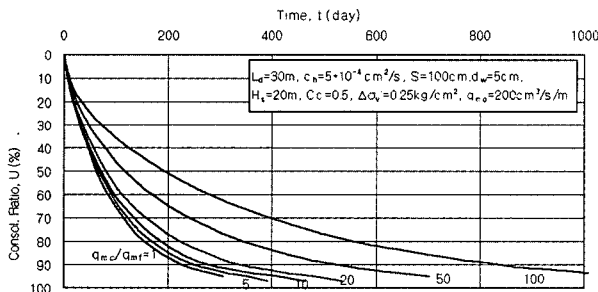


그림 14. 상재증가하중별 압밀지연특성 및 5%이내 압밀지연 소요통수능

해석을 실시한 결과 그림 14와 같이 압밀지연이 5% 범위내인 소요통수능값은 거의 같은 값을 보이고 있다. 즉 소요통수능 값의 결정에 상재증가하중의 영향은 실용적인 면에서 무시할 수 있다.

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 1/2, 1/5, 1/10, 1/100로 감소하는 조건에 대하여 압밀해석을 하였다. 통수능의 감소속도는 지반의 침하량(S_f)에 비례하여 임의 시간 t 에서 $q_{mf} = q_{mo} / \{1 + (q_{mo}/q_{mf} - 1) \times S_t/S_f\}$ 의



(a) 시간-압밀도 곡선

관계식으로 감소하는 것으로 보았다.

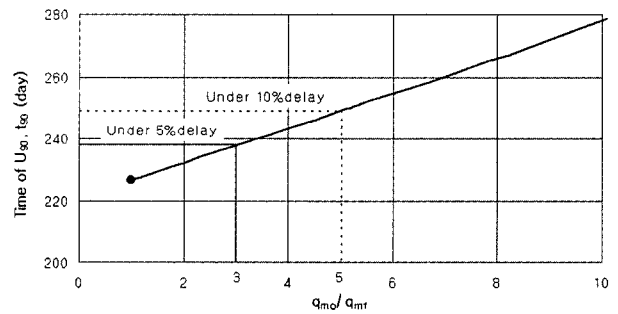
시간에 따른 통수능감소를 고려한 압밀해석결과 그림 15(a)와 같이 배수재의 통수능이 압밀초기부터 압밀완료 시점까지 침하량에 비례하여 감소하는 경우 그 감소비가 클수록 압밀지연이 크게 발생하는 경향을 보이고 있다.

압밀도 90% 도달시간(t_{90})의 변화를 보면 그림 15(b)와 같이 q_{mo}/q_{mf} 비가 클수록 t_{90} 이 크게 증가한다. 그러나 압밀지연(t_{90} 의 증가량)이 5% 이내이기 위한 q_{mo}/q_{mf} 비는 3 이하, 10% 이내는 5 이하이면 된다. 즉, 성토 후 압밀 진행동안 수평배수층의 통수능의 감소비(q_{mo}/q_{mf})가 3 이하이면 시간경과에 따른 수평배수층의 통수능감소의 영향은 실용적인 면에서 무시할 수 있다는 결과이다.

4.3 소요통수능의 결정

4.3.1 소요통수능결정시 고려요소

압밀지연을 발생시키지 않는 수평배수층의 소요통수능 값의 영향요소를 보면 성토속도(T), 흙의 압밀계수(c_v), 연직배수재의 타설간격(S), 압축지수(C_c), 수평배수층의 배수거리(L_d), 연약지반심도(H_s), 상재증가하중($\Delta \sigma_v$) 및 통수능 감소비(q_{mo}/q_{mf})이며 이들의 영향특성을 요약하면 표 3과 같다.

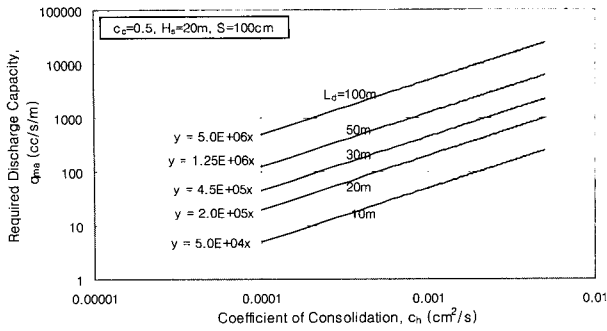


(b) 90% 압밀도 도달소요시간변화

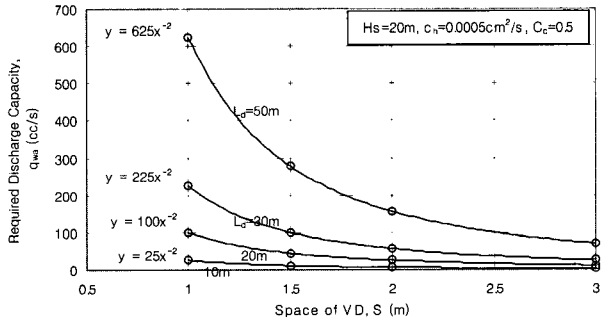
그림 15. 압밀진행동안 배수층의 통수능감소의 압밀지연 특성

표 3. 수평배수층의 소요통수능(q_{ma})에 미치는 영향요소

영향요소	영향특성	영향관계
성토기간(T)	T크면 q_{ma} 감소	미소로 무시
흙의 압밀계수(c_v)	c_v 증가하면 q_{ma} 증가	직선비례
연직배수재의 타설간격(S)	S크면 q_{ma} 감소	제곱에 반비례
배수층의 배수거리(L_d)	L_d 증가하면 q_{ma} 증가	제곱에 비례
압축지수(C_c)	C_c 증가하면 q_{ma} 증가	직선비례
연약지반심도(H_s)	H_s 증가하면 q_{ma} 증가	직선비례
통수능 감소비(q_{mo}/q_{mf})	q_{mo}/q_{mf} 증가하면 q_{ma} 증가	$q_{mo}/q_{mf} \leq 3$ 이면 무시
상재증가하중($\Delta \sigma_v$)	$\Delta \sigma_v$ 증가하면 q_{ma} 감소	미소로 무시



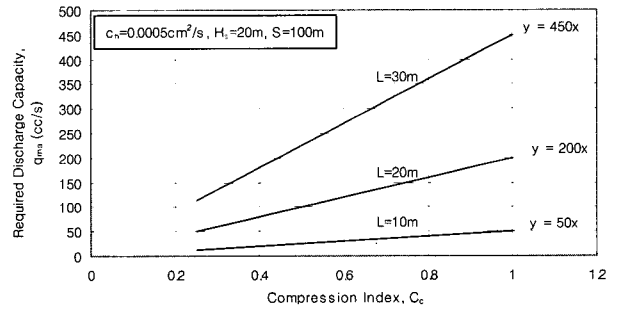
(a) 압밀계수와 소요통수능 관계



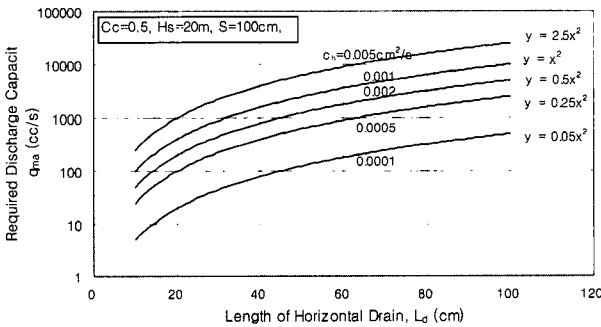
(b) 연직배수재 타설간격과 소요통수능 관계

4.3.2 소요통수능의 결정

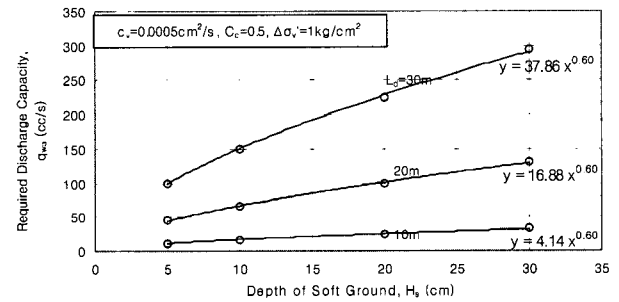
그림 10, 11, 12, 13으로부터 압밀지연이 5% 이내이면 허용할 수 있는 것으로 보고 압밀지연 5% 이내인 수평 배수층의 소요통수능을 보면 그림 16과 같으며, 그 결과를 요약하면 표 4와 같이 압밀계수(c_v), 배수거리(L_d)의 제곱, 압축지수(C_c) 및 연약지반심도(H_s)의 0.6승에 비례하며, 연직배수재의 타설간격(S)의 제곱에 반비례하는 관계로서 $q_{ma} = \alpha \times [c_h \times S^{-2} \times (L_d)^2 \times C_c \times (H_s)^{0.6}]$



(d) 압축지수와 소요통수능관계



(c) 수평배수층의 배수길이와 소요통수능관계



(e) 연약지반심도와 소요통수능관계

그림 16. 각 영향요소별 소요통수능관계(I)

그림 16. 각 영향요소별 소요통수능관계(II)

표 4. 각 영향요소와 소요통수능관계

관계	C_c	L_d (m)	S (m)	H_s (m)	c_v (cm²/s)	관계식	$\{C_c \cdot S^{-2} \cdot (L_d)^2 \cdot (H_s)^{0.6} \cdot c_v\}$	비고
$Q_{ma} \propto C_v$	0.5	10	1	20	0.0005	$Q_{ma} = 50,000C_v$	165.75	그림 16(a)
		20				$Q_{ma} = 200,000C_v$	165.75	
		30				$Q_{ma} = 450,000C_v$	165.75	
		50				$Q_{ma} = 1,250,000C_v$	165.75	
		100				$Q_{ma} = 5,000,000C_v$	165.75	
$Q_{ma} \propto S$	0.5	10	1	20	0.0005	$Q_{ma} = 25/S^2$	165.72	그림 16(b)
		20				$Q_{ma} = 100/S^2$	165.73	
		30				$Q_{ma} = 225/S^2$	165.73	
		50				$Q_{ma} = 625/S^2$	165.73	
$Q_{ma} \propto L_d$	0.5	10	1	20	0.0005	$Q_{ma} = 0.05(L_d)^2$	165.75	그림 16(c)
		20				$Q_{ma} = 0.25(L_d)^2$	165.75	
		30				$Q_{ma} = 0.5(L_d)^2$	165.75	
		50				$Q_{ma} = 1(L_d)^2$	165.75	
		100				$Q_{ma} = 2.5(L_d)^2$	165.75	
$Q_{ma} \propto C_c$	0.5	10	1	20	0.0005	$Q_{ma} = 50C_c$	165.75	그림 16(d)
		20				$Q_{ma} = 200C_c$	165.75	
		30				$Q_{ma} = 450C_c$	165.75	
$Q_{ma} \propto H_s$	0.5	10	1	20	0.0005	$Q_{ma} = 4.14(H_s)^{0.6}$	165.6	그림 16(e)
		20				$Q_{ma} = 16.88(H_s)^{0.6}$	168.8	
		30				$Q_{ma} = 37.86(H_s)^{0.6}$	168.2	
평균							166	
[평균*안전율1.5=250]						$q_{wa} = 250 \cdot C_v \cdot (L_d)^2 \cdot C_c \cdot (H_s)^{0.6} \cdot S^{-2}$		

의 관계식으로 볼 수 있으며, 각 검토조건의 α 값의 평균값은 166이다. 여기에 안전율(1.5)을 고려하여 $\alpha = 1.5 \times 166 \approx 250$ 으로 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$q_{ma} = 250 \times [c_h \times S^{-2} \times (L_d)^2 \times C_c \times (H_s)^{0.6}] \quad (15)$$

- 여기서 q_{ma} : 배수재의 소요통수능($\text{cm}^3/\text{s}/\text{m}$)
 c_h : 흙의 수평방향 압밀계수(cm^2/s)
 L_d : 수평배수층의 배수거리(m)
 C_c : 흙의 압축지수
 H_s : 연약지반심도(m)
 S : 연직배수재의 타설간격(m)이다.

5. 결론

연약지반의 압밀침하를 촉진하기 위한 연직배수공법에서 연직배수재로부터 압밀배수되는 물을 배제하기 위한 수평배수층을 설치한다. 압밀지연을 발생시키지 않는 수평배수층의 소요통수능을 평가하기 위하여, 수평배수층의 통수능을 고려한 연직배수공법의 압밀해석 방법을 개발하고, 각 조건별 수평배수층의 소요통수능을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 기존 설계기준을 보면 연직배수공법의 수평배수층의 소요통수능 값은 성토기간(T)에 영향을 크게 받지만, 본 제안 압밀해석결과 성토기간은 소요통수능 값에 거의 영향이 없는 것으로 분석되었으며, 기존 설계기준은 너무 큰 소요통수능 값을 제시하고 있어 보완이 필요하다는 결과를 얻었다.
- (2) 압밀지연을 발생시키지 않기 위한 수평배수층의 소요통수능은 압밀계수(c_v), 연직배수재의 타설간격(S), 압축지수(C_c)와 수평배수층의 배수거리(L_d) 및 압밀대상 지반층의 두께(H_s)에 크게 영향을 받지만, 상재

- 증가하중($\Delta \sigma_v$)과 성토기간(T)은 그 영향이 미소하여, 그 영향을 무시할 수 있는 결과를 얻었다.
- (3) 성토 후 시간이 경과하면서 수평배수층의 통수능 감소 특성은 그 감소비가 1/3로 감소할 지라도 압밀지연은 5% 이내로 이 감소비가 1/3 이내라면 통수능 감소의 영향은 실용적인 면에서 무시할 수 있는 결과를 얻었다.
 - (4) 연약지반에 연직배수재와 수평배수층을 설치하고, 그 위에 성토시 수평배수층의 소요통수능은 지반토의 압밀계수(c_v , cm^2/s), 압축지수(C_c)와 수평배수층의 배수거리(L_d , m)의 제곱 및 압밀대상 지반층의 두께(H_s , m)의 0.6승에 비례하며, 연직배수재의 타설간격(S, m)의 제곱에 반비례하는 관계로서 압밀지연 5%이내인 소요통수능은 안전율 1.5로 보고 $q_{ma} = 250 \times [c_v \times S^{-2} \times (L_d)^2 \times C_c \times (H_s)^{0.6}] (\text{cm}^3/\text{s}/\text{m})$ 이상이면 되는 상관식을 얻었다.

참고 문헌

1. 김상규, 김현태, 홍병만(2000) “스미어존내 투수성변화를 고려한 연직배수공법의 압밀해석” 한국지반공학회지, 제16권, 제2호, pp.31~40.
2. 김상규, 김현태, 공길용(2001) “연직배수재의 소요통수능 평가” 한국지반공학회지, 제17권, 제1호, pp.35~45.
3. 김상규, 김현태, 공길용(2001) “수평배수층의 소요통수능” 한국지반공학회지, 제17권, 제5호, pp.83~96.
4. 한국도로공사(1998) “도로설계실무편람” pp.586.
5. 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.
6. Onoue, A.(1988), “Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear into consideration”, Soils and Foundations, Vol.28, No.4, pp.165~174.
7. Terzaghi, K.(1943). Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York.
8. Yoshikuni(1979) “バーチカルドレーンの設計と施工管理”, 技報堂出版. pp.58~65.

(접수일자 2001. 9. 17, 심사완료일 2002. 1. 4)