

# 스미어존내 투수성변화를 고려한 연직배수공법의 압밀해석

## Consolidation Analysis of Vertical Drain Considering the Variation of Permeability in Smear Zone

김 상 규\*<sup>1</sup> Kim, Sang-Kyu

김 현 태\*<sup>2</sup> Kim, Hyun-Tae

홍 병 만\*<sup>3</sup> Hong, Byung-Man

### Abstract

In consolidation theory for prefabricated drain, Hansbo assumes that the ratio of permeabilities of the undisturbed soil to disturbed soil( $k_v/k_s$ ) is constant within smear zone during the consolidation process. Experimental studies, however, show that the ratio is variable depending on the distance from the drain and effective stress. In this study, an empirical formula that can predict the variation of permeability within the smear zone was derived on the basis of the results of experiment. With this formula, a slight modification was made for Hansbo's theory. In order to compare the modified theory with Hansbo's original one, consolidation analysis was made with data obtained from in-situ. It was known that when the coefficient of permeability of soil near the drain becomes small due to soil disturbance and/or clogging of the filter, consolidation was delayed more than Hansbo's prediction.

### 요 지

Hansbo는 인공 배수재에 대한 압밀 이론에서 스미어 존의 교란부분에 대한 불교란부분의 투수계수의 비( $k_v/k_s$ )가 일정하다고 가정하였다. 그러나 실험결과에 의하면 투수계수비는 배수재로부터의 거리 및 압밀 진행에 따라서 변한다. 본 논문에서는 정규압밀조건에서 압밀진행동안의 스미어존내 투수계수변화에 대한 경험공식을 유도하고 이를 고려할 수 있는 압밀해석방법을 제안하였다. 실제 압밀시험과 투수시험자료를 이용하여 제안한 해석방법으로 해석된 결과와 Hansbo의 이론을 비교하였다. 배수재 주위의 흙의 교란이 크거나 필터가 막혀서 투수계수가 원래의 값보다 현저히 저하되는 경우에는 실제의 압밀은 Hansbo의 이론으로 계산한 것보다 훨씬 지연된다는 사실을 알게 되었다.

**Keywords :** Vertical drain, Variation of permeability, Clogging, Smear zone

\*1 정희원, 동부산대 학장

\*2 정희원, 농업기반공사 농어촌연구원 책임연구원

\*3 정희원, 농업기반공사 정보관리실 실장

## 1. 서론

연약지반위에 도로, 공업단지 및 주택단지 등의 건설에서 기초지반의 압밀침하를 촉진하기 위하여 연직배수공법이 많이 이용되고 있다. 이 공법에는 압밀지연 요소들이 많기 때문에 이들을 정확히 고려하지 못하여 압밀소요시간이 계획보다 지연되는 사례가 많다.

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

이들의 해석방법에서는 스미어존에 불교란조건의 압밀계수를 적용하고 스미어존의 압밀지연영향은 교란에 따른 투수계수의 평균적인 감소비를 고려하여 해석을 하고 있다.

그러나 대부분의 정규압밀영역의 불교란 흙에 대하여는 실용적인 면에서 압밀계수가 일정하다고 볼 수 있으나 스미어존내의 교란된 흙은 압밀계수가 일정하다고 가정하기가 어렵다는 것이 실험적으로 증명되고 있다. 또한 교란에 의한 투수계수의 감소비도 선행압밀압력의 크기에 따라 그 차이가 크다는 것이 실험적으로 많이 알려져 있다.

그러므로 스미어존내 교란된 흙의 압밀계수와 투수계수가 압밀진행동안 변화하는 특성의 규명과 이를 고려할 수 있는 압밀해석방법의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 스미어존내 교란된 흙의 투수계수변화에 대하여 이론적 분석과 실험을 통해 배수재로부터 거리별, 유효응력별 투수계수변화의 상관식을 제안하였다. 본 상관식을 이용하여 스미어존내 투수계수변화를 고려할 수 있는 압밀해석방법을 제안하고, 그 해석을 통하여 압밀지연을 방지하기 위한 해결과제를 제시하였다.

## 2. 스미어존내 투수계수변화 예측과 확인시험

### 2.1 압밀압력에 따른 투수계수의 변화예측

흙이 구속압력을 받으면 과잉간극수압의 소산과 더불어 유효응력이 증가하면서 간극비가 감소한다. 이로 인하여 투수계수도 함께 감소하는데, Taylor(1948), Lambe and Whitman(1969), Samarasinghe, Huang and Drenvion(1982), Onoue(1991) 등에 의하면 점토질흙에 대하여 흙의 간극비와 로그스케일의 투수계수는 그 관계가 선형적이라고 한다.

여기서 일반적으로 정규압밀영역의 점토는 흙의 간극비와 로그스케일의 유효응력이 선형관계를 가지므로 투수계수와 유효응력사이에는 어떤 상관성이 있음을 예측해 볼 수 있다. 유효응력과 투수계수 사이에 상관성이 높다면, 압밀진행동안 투수계수변화를 쉽게 반영하여 압밀 해석을 할 수 있을 것이다.

Terzaghi 압밀이론의 가정중 압밀계수 일정조건에 대한 유효응력별 투수계수변화는 다음식으로 나타낼 수 있다 (김, 1998).

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

여기서  $k_v$ : 투수계수

$\gamma_w$ : 물의 단위중량

$C_c$ : 압축지수

$c_v$ : 압밀계수

$e_o$ : 초기간극비

$\sigma_v'$ : 유효수직응력이다.

식(1)에 압축지수  $C_c=0.5$ , 초기간극비  $e_o=1.2$ , 압밀계수가  $c_v=0.001 \text{ cm}^2/\text{s}$ 로 일정한 가정조건에 대한  $\sigma_v'$ 와  $k_v$ 의 관계를 계산하여 보면 그림 1과 같다.

여기서 유효응력과 투수계수관계가 그림 1과 같은 관계를 갖는 즉 식 (1)을 만족시키는 흙에서는 Terzaghi 압밀이론의 가정조건인 압밀계수 일정조건을 만족시킨다고 볼 수 있다.

그러나 실제 연약지반토에서 유효응력에 대한 투수계수가 압밀계수 일정조건을 만족시키는지, 또한 스미어존의 교란된 흙에서도 압밀계수 일정조건을 만족시키는지 확인할 필요가 있다.

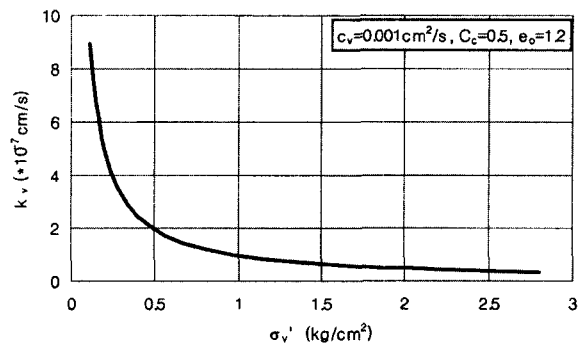


그림 1. 압밀계수 일정조건인 유효응력별 투수계수변화

## 2.2 배수재 현장관입과 압밀 및 투수시험에 의한 검증

### 2.2.1 시험방법 및 시험시료

배수재 타설에 따른 스미어존내 투수계수의 반경방향의 분포를 확인하기 위하여 2개 현장에 그림2와 같이 케이싱타입에 의한 배수재를 관입설치하고 배수재로부터 거리별로 불교란시료를 채취하여 표준압밀시험과 투수시험을 실시하였다.

시험기구는 표준압밀시험기구에 시료바닥으로 침투수를 공급할 수 있는 라인을 만들어 사용하였다.

압밀시험은 압밀압력 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2 6.4 및 12.8 kg/cm<sup>2</sup>으로 단계적으로 압밀을 시키면서 각 압밀단계의 압밀완료시점에 시료바닥으로 침투수압 0.2~0.5 kg/cm<sup>2</sup>을 가하고 단위시간당 투수량을 측정하는 투수시험을 실시하였다.

시험에 사용한 시료는 표 1과 같은 해성퇴적점토를 사용하였으며, 그림2의 시료1은 배수재 인접부에서 수평방향으로 시료를 채취하여 사용하였다.

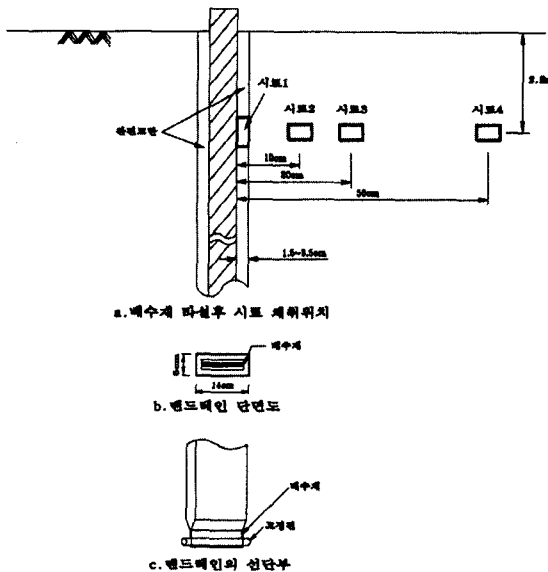


그림 2 배수재의 관입모형과 시료의 채취위치

표 1. 압밀 및 투수시험시료의 물리적 특성

시료명	반월 점토	이원 점토
채취위치	경기 안산시 사동	충남 태안군 이원면
흙 분류(U.S.C.S.)	CL	CH
함수비, $\omega_n$ (%)	48.7	58.3
액성한계, LL (%)	48.6	52.1
소성지수, PI (%)	25.1	27.5

### 2.2.2 투수계수변화 시험결과

배수재로부터 거리별 불교란시료에 대한 투수시험 결과는 그림 3, 4와 같이 측정되었다. 각 하중단계별 압밀완료 후 투수시험 결과는 그림과 같이 불교란시료는 압밀계수 일정조건에 이론계산곡선(식(1)의 값)과 실측값이 잘 일치하는 경향을 보이지만 완전교란시료는 오히려 투수계수가 일정에 가까운 경향을 보이고 있다.

즉 불교란영역은 실용적인 면에서 압밀계수 일정조건을 만족시키지만, 스미어존의 교란된 흙은 압밀계수 일정조건을 만족시키지 못하고 있다.

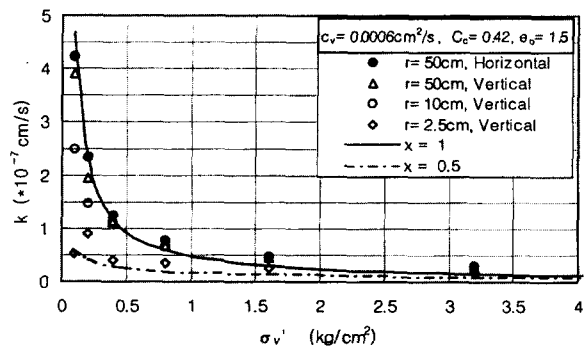


그림 3. 압밀진행동안의 투수계수변화 (반월지구 시료)

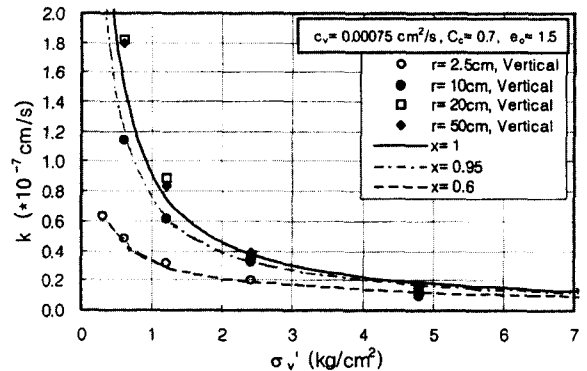


그림 4. 압밀진행동안의 투수계수변화 (이원지구 시료)

## 2.3 투수계수 분포 및 변화공식의 유도

그림 3, 4을 보면 배수재로부터의 거리별 투수계수분포는 배수재 인접부( $r=2.5\text{cm}$ )는 흙이 완전교란된 투수계수분포를 보인다. 불교란시료와 완전교란시료의 투수계수는 유효응력이 어느값 이상으로 증가하면 같은 값을 갖는다. 이때의 응력을  $\sigma'_i$ 이라 하고 식(1)이 응력  $\sigma'_i$ 에서 투수계수가 같은 값을 갖도록  $\sigma'_i$ 을 삽입하여 식을 만들면 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

여기서 x는 교란정도에 따라 변화되는 지수로서 그림 3, 4에서 실선은 지수 x값을 1로 하여 식(2)로 계산한 값이고, 점선은 완전교란 조건의 실측값에 일치하도록 지수 x값을 0.5와 0.6으로 하여 식(2)로 계산한 값을 나타낸 곡선으로 실측값과 잘 일치한다.

배수재인접부는 완전교란조건으로 x=0.5~0.6인 값이 되고, 반경 r=10cm위치에서 x=0.95값을 가지며, r=20cm 위치에서는 불교란조건과 같은 x=1의 값을 갖는다.

Onoue(1991)와 차(1994)이 배수재를 관입한 후에 투수계수를 측정된 반경방향의 투수계수분포를 보면 배수재 인접부가 가장 작고 멀어질수록 증가하는 포물선분포를 보이고 있다.

반경방향의 투수계수가 포물선분포라고 보고 본 연구에서 측정된 세점의 x값으로부터 반경별 지수 x값을 구하여 보면 반경 r에 비례하는 관계에 있다는 것을 알 수 있으며, 다음 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$X = \frac{a}{r} + b \quad (\text{지수}) \quad (3)$$

여기서 a와 b는 반경 r에 따른 투수계수의 분포특성을 나타내는 계수로서 이 값의 결정은 실용적인 면에서 완전교란과 불교란조건으로 압밀시험을 실시하여 그림 2, 3과 같이 완전교란 조건의 x값을 구한 다음 배수재인접부 r=3.75cm 위치는 완전교란조건의 x값을, r=20cm 위치는 x=1이 되도록 상수 a와 b를 계산하면 된다.

반경 r=3.75cm에서 x=0.5, r=20cm는 x=1인 지수 x값의 관계식을 구하면 x = -2.308/r + 1.115을 얻을 수 있으며, 각 압밀도별 투수계수분포를 식(2)에 의해 구하면 그림 5

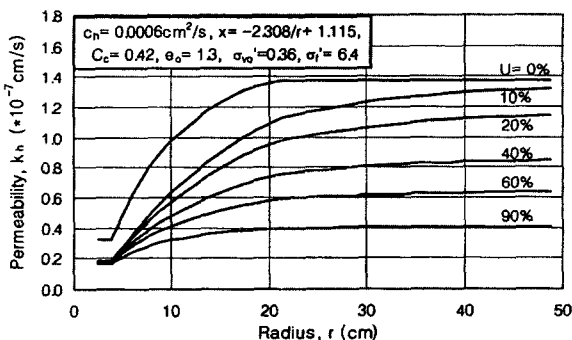


그림 5. 압밀진행동안 평균압밀도별 반경방향의 투수계수분포

와 같이 투수계수가 압밀진행에 따라 변화하는 것을 예측해 볼 수 있다.

여기서 Barron(1948)해의 일정변형률 가정조건의 각 압밀도별 반경방향의 간극수압분포로부터 구한 각 요소의 유효응력( $\sigma_v'$ )을 식(2)에 대입하여 투수계수를 구하였다. 또한 수평방향의 압밀계수( $c_h$ )와 투수계수( $k_h$ )의 관계가 수직방향( $c_v$ 와  $k_v$ )의 관계와 같다고 보고 식(2)에서  $c_v$  대신  $c_h$ 를 사용하여 수평방향 투수계수( $k_h$ )를 구하였다. 이 관계에 대하여 앞으로 시험을 계속할 계획이다.

### 3. 스미어존내 흙의 투수성 변화를 고려한 연직배수 압밀해석

#### 3.1 가정조건

압밀해석식을 유도하는데 다음과 같은 가정을 설정하였다.

- (1) 압밀진행동안의 수직방향변형은 동일(equal strain)하다.
- (2) 흙속의 물의 흐름은 Darcy의 법칙을 따른다.
- (3) 압축지수  $C_c$ 와 재압축지수  $C_r$ 은 일정하다.
- (4) 스미어존의 유효응력별 투수계수변화는 식(2)와 같이 변화된다.

#### 3.2 해석이론유도

Inner radial 방향배수에 의한 압밀해석방법을 유도하기 위하여 수평방향의 흐름만을 고려하여 그림 6(a)와 같이 유한요소계로 나누어 생각해 보자.

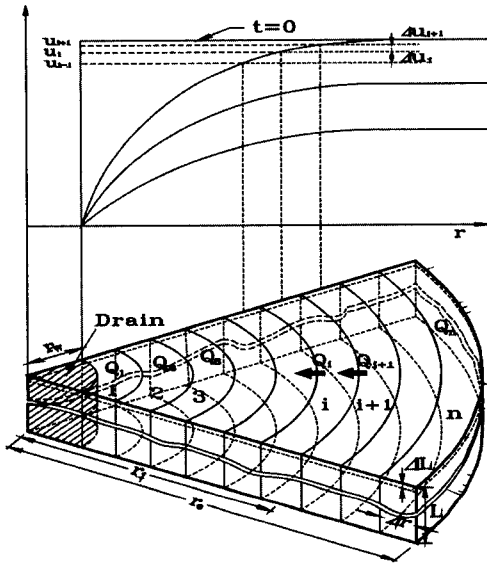
Inner radial 방향 배수에서 반지름  $r_i$  원주를 통과하는 투수량은

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{k_{hi}}{\gamma_w} \frac{\Delta u}{\Delta r} 2\pi r_i L \quad (4)$$

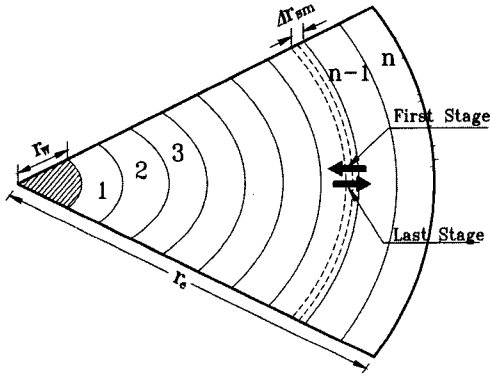
식이 된다.

여기서  $k_{hi}$ 는 i요소의 수평방향 투수계수이며, 반지름  $r_i$  원주를 통과하는 물 및 요소의 이동체적은 연직변위  $\Delta L$ 로부터 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Q}{\Delta t} &= - \frac{\Delta [\pi (r_e^2 - r_i^2) L]}{\Delta t} \\ &= - \pi (r_e^2 - r_i^2) \frac{\Delta L}{\Delta t} \end{aligned} \quad (5)$$



(a) Distribution of pore pressure and inner radial drain during consolidation



(b) Horizontal movement of element  
그림 6. 연직배수공법의 압밀해석 모식도

여기서 실제 라디얼 배수압밀에서 각 시간별 수평방향의 압밀도가 다르므로 각 요소의 수평이동이 발생된다. 각 요소의 수평방향 이동  $\Delta V_{sm}$ 을 고려한 물만의 흐름량은 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Q}{\Delta t} &= -\frac{\Delta[\pi(r_e^2 - r_i^2)L]}{\Delta t} - \Delta V_{sm} \quad (6) \\ &= -\pi(r_e^2 - r_i^2)\frac{\Delta L}{\Delta t} - \Delta V_{sm} \end{aligned}$$

투수에 의한 유량과 체적변화에 의한 유량계산값이 같은 조건 즉  $[\frac{\Delta Q}{\Delta t}]_{ki} = [\frac{\Delta Q}{\Delta t}]_{dv}$ 로부터 i요소의 수평 방향으로 이동되는 체적  $\Delta V_{sm,i}$ 은 다음 식으로 구할 수 있으며

$$\begin{aligned} \Delta V_{sm,r=i} &= -\pi(r_e^2 - r_i^2)\frac{\Delta L}{\Delta t} \\ &\quad - \frac{k_h}{\gamma_w} \left( \frac{\Delta u}{\Delta r} \right)_{r=i} 2\pi r_i L \quad (7) \end{aligned}$$

i-1와 i요소 경계선의 수평이동 거리  $\Delta r_{sm}$ 은 다음 식과 같다

$$\Delta r_{sm} = -\pi(r_e^2/r_i - r_i)\frac{\Delta L}{\Delta t} - \frac{k_h}{\gamma_w} \frac{\Delta u}{\Delta r} 2\pi L \quad (8)$$

여기서 임의 시간에 간극수압분포로부터 미소시간  $\Delta t$  동안의 배수재로 흘러나오는 유량을 구하고 이 유량으로부터  $\Delta L$ 을 구하여  $\Delta r_{sm}$ 을 구할 수 있다. 여기서  $\Delta r_{sm}$ 이 발생하면 i요소의  $t=j+1$ 시간에 단면적  $A_{i(t=j+1)}$ 은 다음 식과 같이 변화된다.

$$A_{i(t=j+1)} = [\Delta r_{i(t=j)} + \Delta r_{sm(t=j-k)}] \cdot r_{i(t=j)} \quad (9)$$

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

$$\epsilon_{v(r=i)} = \frac{Q_i - Q_{(i+1)}}{A_{i(t=0)} \cdot L_0} \quad (10)$$

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

$$\Delta e_{(r=i)} = \epsilon_{v(r=i)}(1 + e_0) \quad (11)$$

여기서 정규압밀조건에 대하여

$$\Delta e = \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot \log \frac{\sigma_{v_{i+1}}'}{\sigma_{v_i}'}$$

과압밀영역에 대하여

$$\Delta e = \frac{C_r}{1 + e_0} \cdot \log \frac{\sigma_{v_{i+1}}'}{\sigma_{v_i}'}$$

$t=j+1$ 에서  $i$ 요소의 유효응력  $\sigma_{v_{t-j+1}}$ 은 다음 식으로 구하고

$$\sigma_{v_{t-j+1}}' = 10^{\left[ \frac{\Delta e(1+e_0)}{C_c} + \log \sigma_{v_t}' \right]} \quad (12)$$

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

$$\Delta u_{i(t-j-k)} = \sigma_{v_{t-j+1}}' - \sigma_{v_{t-j}}' \quad (13)$$

이 관계로부터 각 요소의  $\Delta t$  동안의 과잉간극수압소산량  $\Delta u_i$ 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  $\Delta t$  동안의 물의 흐름을 계산하여 간극비변화량  $\Delta e$ 와 과잉간극수압 소산량  $\Delta u_i$ 을 다시 계산하는 과정을 반복하면 압밀진행과정을 구할 수 있다.

해석프로그램은 그림6의 요소를 20개의 요소로 나누어 미소시간( $\Delta t$ )동안의 각 요소의 간극수압, 투수량, 간극비 및 유효응력변화를 압밀이 완료될 때까지 반복하여 계산하도록 작성하였다. 식(4)의 각 요소의 투수계수는 각 계산단계( $t=i$ )에서 그 요소의 유효응력( $\sigma_{v_{t-i}}'$ )을 식(2)에 대입하여 구한 값을 적용할 수 있도록 프로그램을 구성하였다.

### 3.3. 실예에 의한 해석결과와의 비교

#### 3.3.1 Hansbo해석과의 비교를 통한 검증

본 해석방법의 검증을 위하여 기초지반의 토질정수 및 배수조건이 표 2와 같은 가정조건에 대하여 압밀해석을 실시하였다. 스미어존의 투수계수가 Hansbo해의 압밀계수 일정이라는 가정조건을 만족시키는 식(1)과 같이 변화하는 조건으로 본 제안해석과 Hansbo 해석결과를 비교하였다.

임의 시간에 각 요소의 유효응력  $\sigma_v'$ 을 식(1)에 대입하여 투수계수를 구하고 그 값을 식(4)에 적용하여 각 요소의 투수량을 계산하였다. 여기서는 본 제안 해석방법을 검증하기 위한 것으로  $k_v=k_h$  즉  $c_v=c_h$ 이라고 가정하였다.

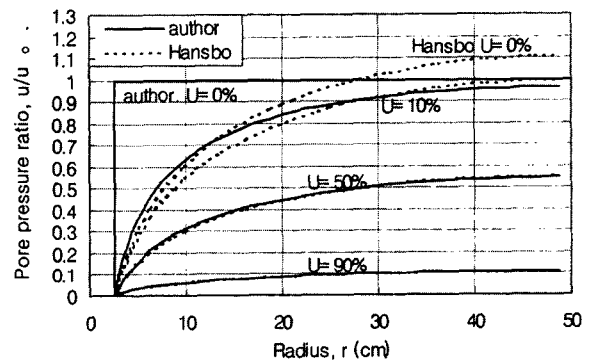
압밀해석결과 각 압밀도별 과잉간극수압분포는 그림 7 a)와 같이 Hansbo 제안공식의 값이 초기에는 이치적으로 맞지 않는 값을 보인다.

표 2. 프로그램 검증을 위한 기초지반조건 및 토질정수(예)

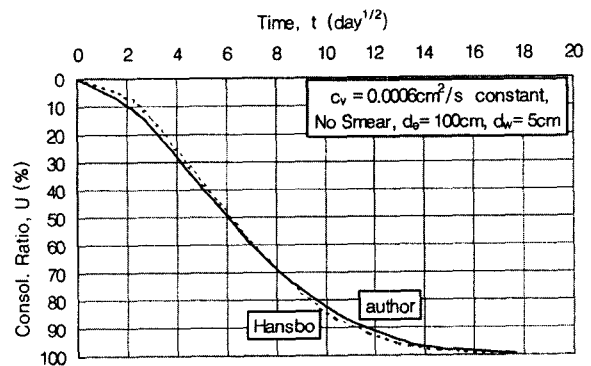
구 분	토질정수
연약층 심도(d)	10m(중심층위치 5m)
초기 유효응력( $\sigma_{v_0}'$ )	0.375 kg/cm <sup>2</sup>
상재증가 유효응력( $\Delta \sigma_v'$ )	1 kg/cm <sup>2</sup>
초기간극비( $e_0$ )	1.2
압축지수( $C_c$ )	0.42
압밀계수( $c_v$ )	$6 \times 10^{-4}$ cm <sup>2</sup> /s
영향원의 직경( $d_e$ )	100 cm
배수재의 환산직경( $d_w$ )	5 cm

즉 하중이 가해진 초기( $t=0$ )에는 라디안방향에 전체의 과잉간극수압비( $u/u_0$ )가 1이어야 하나 라디얼방향으로 0부터 1.1까지 분포하는 모순점을 보이며 시간의 경과에 따라 점차 일치하는 경향을 보인다. 이는 Barron해의 일정변형율조건인 모순 때문인 것으로 판단된다

시간-압밀도관계는 그림 7 b)와 같이 잘 일치하는 결과를 보이고 있다.



(a) Pore pressure distribution



(b) Time-consolidation ratio relationships

그림 7. 스미어가 없는 조건에 대한 Hansbo해와 본 제안해석방법의 해석결과 비교

### 3.3.2 스미어존의 크기에 따른 해석결과의 비교

스미어존의 크기  $r_s$ 의 차이에 의한 해석결과를 비교하기 위하여 기초지반조건이 표2와 같은 조건에 대하여 스미어존내의 투수계수가 Hansbo해의 가정조건과 같이  $k_s/k_h$ 만큼 균일하게 감소하는 조건으로  $S=r_s/r_w=1, 2, 4, 8$  및 20조건에 대한 압밀해석을 실시하여 그 결과를 비교하였다.

$r < S \cdot r_w$  범위의 투수계수는 그 요소의  $\sigma_v'$ 을 식(1)에 대입하여 구한 값의 1/2.5값을 투수계수로 하고,  $r \geq S \cdot r_w$  범위의 투수계수는 그 요소의  $\sigma_v'$ 을 식(1)에 대입하여 구한 값을 적용하였다.

압밀해석결과 그림8과 같이 배수재환산직경에 대한 스미어영역의 비  $S$ 가 8이상에서는 차이가 있으나  $S=8$ 이하에서는 Hansbo해와 본 제안해석방법이 잘 일치한다.

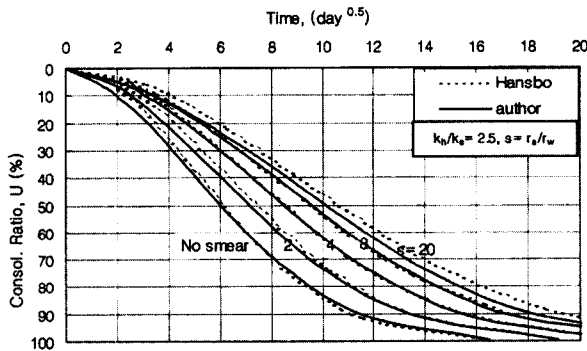


그림 8. 스미어존의 크기별 Hansbo해와 본 제안해석방법의 해석결과 비교

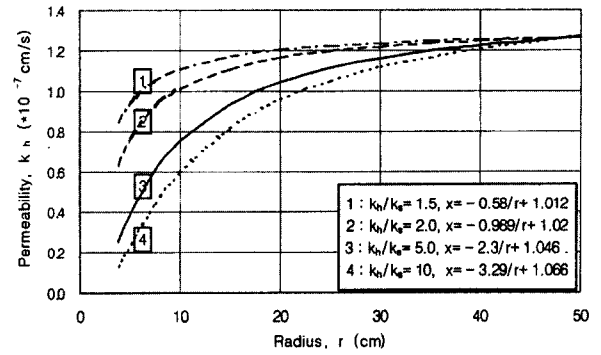
## 4. 스미어존내 투수계수변화와 압밀지연영향

### 4.1 교란에 의한 투수성감소의 영향

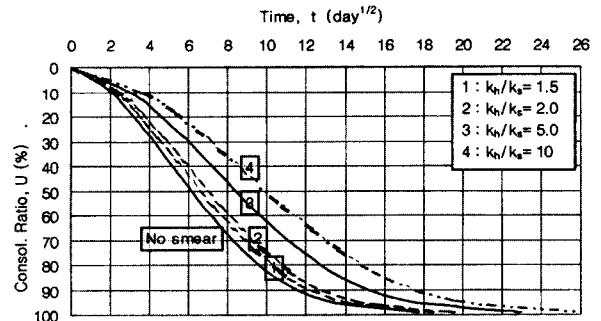
배수재 타설시 스미어존내 교란에 따른 투수계수의 감소가 압밀지연에 미치는 영향을 분석하기 위하여 배수재 인접부의 흙에 투수계수가 그림 9(a)와 같이  $k_{h0}/k_s=1.5, 2, 5, 10$ 배로 감소하는 조건에 대하여 압밀해석을 실시하였다.

각 요소의 투수계수는 식(2)의 지수  $x$  값을  $r=3.75$ cm에서 초기 유효응력  $\sigma_{v0}'=0.375$ kg/cm<sup>2</sup> 조건일때 투수계수 ( $k_s(\tau=0)$ )가  $k_{h0}$ 의 1/1.5, 1/2, 1/5 및 1/10이 되고  $r=50$ cm에서  $x=1$ 이 되는 지수  $x$ 에 관한 상관식을 식(3)으로 구하고, 각 요소의 투수계수는 식(2)로 구하여 임의시간의 각 요소의 투수량을 구하였다.  $x$ 의 상관식은 그림 9(a)의 범례에 명기하였다.

해석결과 그림 9(b)와 같이 그 차이가 매우 크게 나타났다. 투수계수 감소에 따른 90% 압밀완료시간의 차이는  $k_{h0}/k_s=5$



(a) Distribution of permeability in radial direction



(b) Consolidation curve with smear

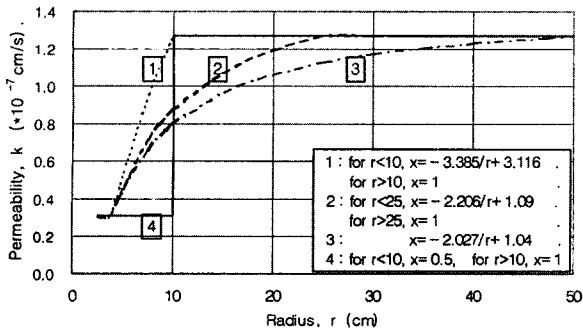
그림 9. 스미어에 의한 투수계수감소비별 시간-압밀도의 변화

를 기준으로 할 때 약  $\pm 35\%$ 로 그 영향이 매우 크다. 여기서 교란에 따른 투수계수 감소는 기초지반의 흙의 종류와 유효응력에 따라서 그 차이가 크므로 스미어존내 교란된 흙에 대한 유효응력별 투수시험을 실시하는 것이 필요함을 알 수 있다.

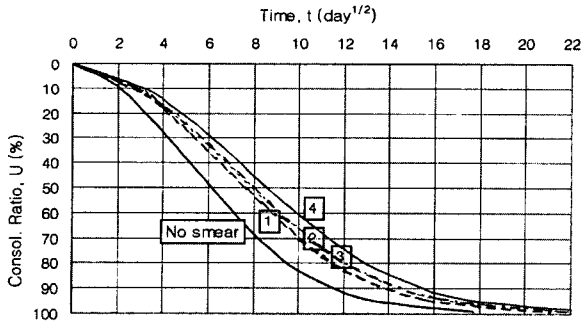
### 4.2 스미어존 범위의 영향

스미어존내 반경방향의 투수계수 분포가 압밀속도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 압밀하중 재하전 투수계수분포를 그림 10(a)와 같이 반경방향의 투수계수분포가  $\log r$ 에 비례하는 조건으로 Smear의 범위( $r_s$ )를 ① 10cm, ② 25cm, ③ 50cm조건과 ④ 스미어영역  $r_s=10$ cm의 투수계수가  $k_s/k_h$ 비만큼 동일하게 감소하는 조건(기존해석방법)에 대하여 압밀해석을 실시하였다.

각 요소의 투수계수는 식(2)에서 지수  $x$ 를  $r=3.75$ cm 위치는  $x=0.5$ 로 하고, 가정①의  $r \geq 10$ cm 위치는  $x=1$ , ②의  $r \geq 25$ cm 위치는  $x=1$ , ③의  $r \geq 50$ cm 위치는  $x=1$ 이 되는 식(3)의 a와 b계수를 구하여 각 요소의  $x$ 값을 구하여 식(2)로 임의시간의 투수계수를 구하였으며, 가정④는  $r < 10$ cm 위치는  $x=0.5$ ,  $r \geq 10$ cm 위치는  $x=1$ 을 식(2)

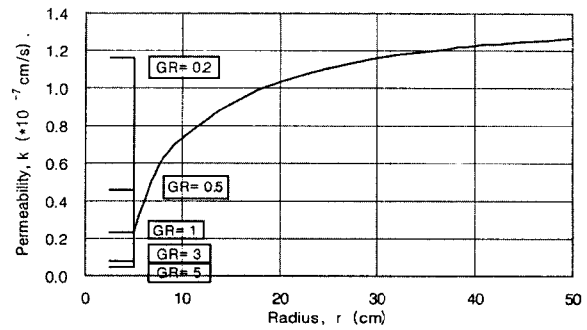


(a) Distribution of permeability in radial direction

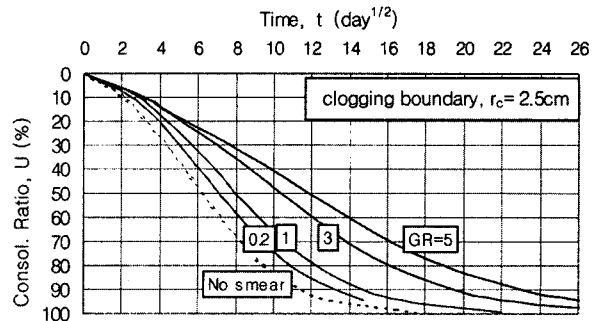


(b) Time-consolidation ratio

그림 10. 스미어존의 크기별 시간-압밀도의 변화



(a) Distribution of permeability in radial direction



(b) Consolidation curve with clogging affection

그림 11. Clogging에 의한 투수계수변화와 시간-압밀도의 변화

에 대입하여 투수계수를 구하고 투수량을 계산하였다.

압밀해석결과 그림 10(b)와 같이 스미어에 의한 r방향의 투수계수분포가  $\log r$ 에 비례하는 ①, ②, ③조건에 대한 90% 압밀완료시간의 차이는 10% 범위내에 있으나, 스미어영역의 투수계수가  $k_s/k_0$ 비만큼 동일하게 감소하는 조건 ④에 대하여는 그 차이가 22%정도로 해석되었다.

여기서, 건설장비의 발달과 더불어 맨드레인의 크기가 최소화되고 관입시스템이 발달한 현재에는 투수성분포가 조건 ④보다는 조건 ①, ②, ③이라고 보면 스미어존의 크기가 연직배수공법의 압밀지연에 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있다.

### 4.3 Clogging의 영향

배수재 필터 주위 흙이 Filtration이나 Clogging이 발생된다면 배수재 주위 두께 2.5cm 흙의 투수계수가 그림 11(a)와 같이 GR에 반비례하여 변화하는 조건에 대하여 압밀해석을 실시하였다.

Clogging에 의한 투수계수 감소는 시간이 경과하면서 서서히 진행된다. 상재하중 재하후 GR=3은  $t_c=30$ 일동안, GR=5는  $t_c=50$ 일동안 Clogging이 서서히 진행되어 배수재 주위 두께 2.5cm의 흙의 투수계수가 서서히 감소

하는 조건, 즉  $k_{sc} = k_s / \{1 + (GR - 1) \times (t/t_c)\}$  for  $t < t_c$ ,  $k_{sc} = k_s / GR$  for  $t > t_c$  로 감소하는 것으로 고려하였다.

GR값 0.2, 1, 3, 5의 조건에 대한 해석결과는 그림 11(b)와 같이 압밀지연영향이 매우 크게 나타났다. Clogging현상이 발생되어 필터주위의 2.5cm의 흙이 GR=3이면 90% 압밀소요시간이 1.77배, 5이면 2.5배 증가하는 것으로 해석되었다.

여기서 Clogging에 대한 일반적인 기준인 GR=3일 때, 즉 배수재 주위 두께 2.5cm의 흙의 투수계수가 1/3로 감소할 경우 90%압밀소요시간이 1.77배로 증가하게 되는데 이는 공정관리에 큰 차질을 불러올 수 있는 시간이라고 판단된다.

또한 Filtration에 의한 투수계수가 증가하는 경우는 소요압밀시간을 단축시키기는하지만 90% 압밀소요시간이 0.8배로 감소량이 생각보다 그리 크지 않았으며 GR=0.5 이하가 되어도 압밀시간은 0.8배보다 더 적게 단축되지 않는 것으로 나타났다.

## 5. 결론

본 연구에서는 현장에 배수재를 관입후 거리별로 채취한 시료의 압밀과 투수시험으로부터 스미어존내 투수계



수변화를 나타낼 수 있는 유효수직응력과 투수계수의 상관식을 제안하고, 본 투수계수 변화를 고려할 수 있는 압밀 해석방법을 제안하였다.

Hansbo해석과의 비교를 통하여 본 제안 해석방법의 타당성을 검증하였으며, 본 해석방법으로 스미어존내 투수성변화가 압밀지연에 미치는 영향을 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 해성점토의 비교란시료는 압밀계수 일정조건을 실용적인면에서 만족하지만, 스미어존내 교란된 흙은 압밀계수 일정조건을 만족시키지 못함을 알 수 있었다.
- 2) 스미어존내 투수계수는 압밀계수  $c_v$ , 압축지수  $C_c$ , 초기간극비  $e_0$ , 유효응력  $\sigma'_v$ , 교란과 불교란의 투수계수가 같은 값을 갖는 유효응력  $\sigma'_f$  값과의 관계로서

$$k_v = \frac{0.434 \gamma_w C_c c_v}{(1 + e_0) \sigma'_f} \left( \frac{\sigma'_f}{\sigma'_v} \right)^x \text{의 경험식을 얻을 수 있었다.}$$

- 3) 압밀시간에 미치는 영향을 보면 스미어존 크기의 영향은 적고, 교란에 의한 스미어존내 투수성 감소비( $k_{ho}/k_s$ )의 영향이 크므로, 스미어존내 교란된 흙에 대한 압밀과 투수시험이 필요하다.
- 4) Clogging에 대하여 GR값이 3이하이면 허용할 수 있는 것으로 알고 있으나, GR값이 3일 때 90%압밀소요시간이 70%이상 증가하므로 GR값의 기준을 낮추거나 압밀

해석에서 Clogging의 영향을 고려한 해석이 필요하다는 결론을 얻었다.

## 참고 문헌

1. 김현태(1998), "스미어존내 투수성변화와 웰저항을 고려한 연직배수공법의 압밀해석", 박사학위논문, 동국대학교, pp. 8~50.
2. ASTM D 5101-90, "Standard test method for measuring the soil-geotextile system clogging potential by the gradient ratio".
3. Barron, R. A.(1948), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells", Trans, ASCE, 2346, pp. 221~228.
4. 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.
5. Lambe, T. W., and Whitman, R. V.(1969), "Soil Mechanics", John Wiley and Sons, Inc., New York, pp. 289~292.
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. Onoue, A., Ting, N-H., Germaine, J.T. and Withman, R.V.(1991), "Permeability of disturbed zone around vertical drains", Proc. of ASCE Geotech. Engng. Congress, Colorado, pp.879~890.
8. Samarasinghe, A. M., Huang Y. H., and Drenvich, V. P. (1982), "Permeability and consolidation of normally consolidated soils", Journal of the Geotechnical Eng. Division, Vol. 108, No. GT6, pp. 266~290.
9. Taylor, D. W.(1948), "Fundamentals of Soil Mechanics", John Wiley and Sons, Inc., New York N. Y., pp.114~119.
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 1999. 7. 31)