

## Vertical Drain의 압밀이론에 관한 비교 연구

### A Comparative Study on the Consolidation Theory of Vertical Drains

채영수<sup>1)</sup>, Young-Su Chae, 김영남<sup>2)</sup>, Young-Nam Kim,  
이강일<sup>3)</sup>, Kang-il Lee, 조철현<sup>4)</sup>, Chul-Hyun Cho

<sup>1)</sup> 수원대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, The Univ. of Suwon

<sup>2)</sup> (주)동원토질 상무이사, Executive Director, Dongwon Drilling & Soil Engineering Co., LTD.

<sup>3)</sup> (주)동원토질 연구소장, Chief Researcher, Dongwon Drilling & Soil Engineering Co., LTD.

<sup>4)</sup> 수원대학교 토목공학과 석사 과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, The Univ. of Suwon

**개요(SYNOPSIS)** : This study compared and analyzed the consolidation theories of vertical drain which is frequently used in soft ground improvement. It applied Hansbo-Onoue's theory for the consolidation of vertical drain, and examined two cases distinguished by whether smear effect and well resistance are taken account of altogether or only well resistance is under the consideration.

Furthermore, it also examined differences of the consolidation theories by comparing with TCON, a Finite Difference Method program and measured values.

**주요어(Key words)** : consolidation, smear, vertical drain, well resistance,

## 1. 서 론

연약지반상에 축조되는 구조물의 안정성을 확보하고 연약지반의 강도증대와 압밀축진을 위해 국내에서 수행되는 연약지반 처리공법으로는 주로 선행압밀하중공법을 병행한 sand drain 공법, paper drain 공법 또는 pack drain 공법등을 사용하고 있다. vertical drain의 이론해는 Barron(1948)에 의해 본격적으로 이루어 졌고, 그 후 Yoshikuni & Naganodo(1974), Hansbo(1979, 1981), Onoue (1988)등에 의해 발전되었다. 이러한 vertical drain의 이론해는 설계시 사용되는 각각의 변수에 의해서 압밀도의 차이를 보이고 있는데 본 연구에서는 vertical drain의 압밀이론들을 비교·검토하여 그 차이를 규명하고자 한다.

vertical drain 압밀이론의 비교·검토는 pack drain을 대상으로 3가지 측면에서 검토하였다. 첫째, 스미어항과 well resistance 항에 관련된 변수들에 따른 공식의 차이점을 비교·분석하였고 둘째, 설계시 사용되는 여러 가지 변수들을 변화시켜 압밀도의 차이를 비교·분석하였다. 마지막으로, 현장의 실측자료를 이용하여 vertical drain의 압밀이론 곡선과 실측 곡선 그리고 유한차분법 프로그램인 TCON을 비교하여 그 차이를 검토하였다.

## 2. Vertical Drain의 압밀이론식

Barron(1948)은 Terzaghi의 압밀이론을 기본으로 해서 압밀층 전층에 대한 평균압밀도를 등변위압밀(equal strain condition)조건에 가정하여 교란효과(smear effect)와 배수저항(well resistance)을 고려하지 않은 이상적인 경우에 대해 (1)식과 같이 제시하였다.

$$U_h = 1 - \exp(-8T_h/F(N)) \quad (1)$$

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

여기서,  $N(=d_e/d_w)$  : 간격비

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

$d_e$  : 영향원의 직경

$d_w$  : 연직배수재의 직경

$t$  : 압밀소요시간

Hansbo(1979)는 Barron이 제안한 식(2)를 수정하여 스미어존과 배수저항을 고려한 식을 (3)식과 같이 제안하였다.

$$U_h = 1 - \exp(-8T_h/\mu_{sw}) \quad (3)$$

$$\mu_{sw} = \mu_s + \mu_w$$

$$\mu_s = \frac{N^2}{N^2-1} \left( \ln\left(\frac{N}{S}\right) + \eta \ln S - \frac{3}{4} \right) + \frac{S^2}{N^2-1} \left( 1 - \frac{S^2}{4N^2} \right) + \eta \frac{1}{N^2-1} \left( \frac{S^4-1}{4N^2} - S^2 + 1 \right) \quad (4)$$

$$\mu_w = \pi z(2H-z) \frac{k_h}{q_w} \left( 1 - \frac{1}{N^2} \right) \quad (5)$$

여기서,  $S(=d_s/d_w)$  : 스미어존의 직경비

$\eta (=k_h/k_s)$  : 스미어존의 투수계수비

$k_h$  : 비교란영역의 수평방향 투수계수

$k_s$  : 교란영역의 투수계수

$d_s$  : 교란영역의 직경

$z$  : 임의의 깊이

$q_w$  : 배수용량( $=\pi r_w^2 k_w$ )

$H$  : 점토층의 두께

$k_w$  : 연직배수재의 투수계수

Onoue(1988)가 Yoshikuni & Naganodo(1974)의 배수저항계수  $L$ 을 사용하여 교란 효과와 well resistance를 고려하여 vertical drain 설계를 위한 간편식을 제시한 것이 (6)식이다.

$$U_h = 1 - \exp\{-8T_h/(F(N') + 0.8L)\} \quad (6)$$

$$F(N') = \frac{(N')^2}{(N')^2-1} \ln(N') - \frac{3(N')^2-1}{4(N')^2} \quad (7)$$

여기서,  $N' = NS^{\eta-1}$

$$L = \frac{32}{\pi^2} \frac{k_h}{k_w} \left( \frac{H}{d_w} \right)^2$$

표. 2 vertical drain의 압밀이론 식에 대한 각 항의 비교

	간격항 + smear 항	well resistance 항
Hansbo	$\ln\left(\frac{N}{S}\right) + \eta \ln s - 0.75$	$\pi z(2H-z)k_h/q_w$
Onoue	$\frac{(N')^2}{(N')^2 - 1} \ln(N') - \frac{3(N')^2}{4(N')^2}$	0.8L

### 3. 해석 및 분석

3.1절과 3.2절의 분석에 적용된 초기값은 표.1에 나타내었고 이 초기값을 토대로 하여 여러 변수를 변화시켜 해석을 수행하였다.

표. 1 분석에 적용된 초기값

$d_w = 12\text{cm}$	$d_e = 158\text{cm}$
$d_s = 18\text{cm}$	$H = 1500\text{cm}$
$C_h = 0.002\text{cm}^2/\text{sec}$	$C_v = 0.001\text{cm}^2/\text{sec}$
$k_s = 2 \times 10^{-8}\text{cm}/\text{sec}$	$k_h = 10^{-7}\text{cm}/\text{sec}$
소요시간 = 100일	
$d_s/d_w = 1.5$	$C_h/C_v = 2$
$k_h/k_s = 5$	

#### 3.1 스미어항과 well resistance항에 대한 검토

이 절에서는 Hansbo와 Onoue가 제안한 식의 차이를 검토하기 위하여 각 공식을 세분화(표.2 참조)시켜 스미어 항과 well resistance 항으로 나누어 비교하였다. 스미어 항을 비교하기 위해서 그림.1과 같이 스미어존의 직경비( $S = d_s/d_w$ )와 투수계수비( $\eta = k_h/k_s$ )를 달리하였고, well resistance 항을 비교하기 위해서는 그림.2와 같이 수평방향투수계수( $k_h$ )와 점토층의 두께( $H$ )를 달리하였다. 그 결과 그림.1에서 보는 바와 같이 Hansbo가 제안한 식과 Onoue가 제안한 식의 스미어 항의 차이는 거의 없이 일치하므로 두 식의 압밀도 차이는 스미어 항에 의해 발생되지 않는다는 것을 알 수 있다.

반면에 두 식의 well resistance 항은 그림.2와 같이 연직배수재의 투수계수에 따른 수평방향투수계수와 점토층의 두께에 의해 서로 차이가 남을 알 수 있다. 또한, 연직배수재의 투수계수( $k_w$ )에 따라 압밀 지연 정도를 예측할 수 있다.

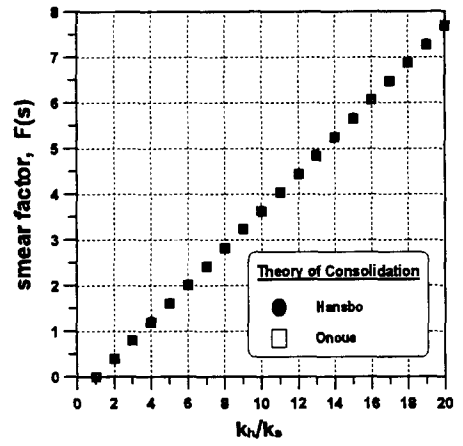
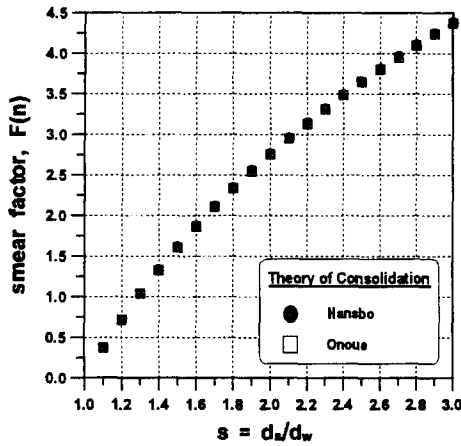


그림. 1 스미어 항

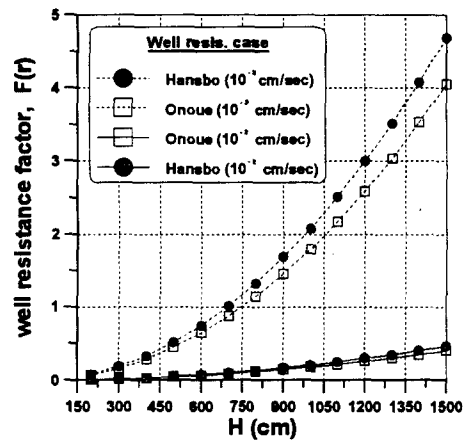
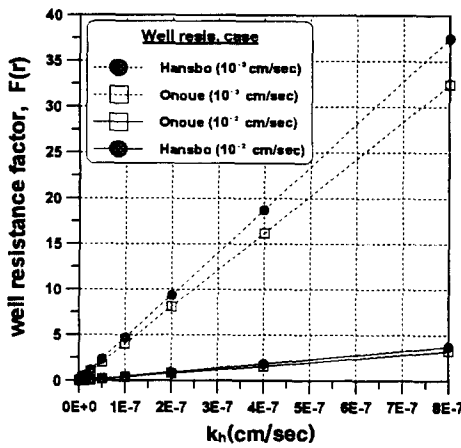


그림. 2 well resistance 항

### 3.2 각 변수에 대한 이론해의 비교

이 절에서는 Hansbo가 제안한 식과 Onoue가 제안한 식을 교란 효과와 well resistance를 모두 고려한 경우(case I)와 well resistance만을 고려한 경우(case II) 각각에 연직배수재의 투수계수( $k_w$ )를 표.3과 같이  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ cm/sec로 나누어 분석하였다. 그리고, 교란효과와 well resistance를 모두 무시한 Barron의 이상적인 해(표.4의 case III)를 점토층의 두께(H) 변화에 따른 교란효과와 well resistance의 영향을 살펴 보기 위해 명시하였다. 먼저 연직배수재의 투수계수( $k_w$ )를 변화시켜 두 식의 압밀도를 계산한 결과인 표.3과 그림.3을 살펴보면, 이 결과로 볼 때  $k_w = 10^{-2}$ cm/sec 일때 Hansbo 식에 의한 압밀도와 Onoue 식에 의한 압밀도가 별 차이 없이 유사하게 나타나고 있다. 반면  $k_w = 10^{-3}$  cm/sec 일때는 두 식의 오차가 case I 인 경우는 15%, case II인 경우는 17%가 발생하고 있어 이에 따라  $10^{-3}$ cm/sec의 연직배수재를 사용시에 두 식은 과다 또는 과소설계가 우려될 수 있다. 또한  $k_w$ 에 따라 그 차이는 다르지만 Onoue 식에 의한 압밀도가 Hansbo의 식에 의한 압밀도보다 크게 산정되고 있다.

표. 3 연직배수재의 투수계수( $k_w$ )에 대한 영향

압밀도(%) $k_w$	case I		case II	
	Hansbo	Onoue	Hansbo	Onoue
$10^{-2}$ cm/sec	80.58	82.27	93.53	95.07
$10^{-3}$ cm/sec	49.45	58.51	55.91	67.45

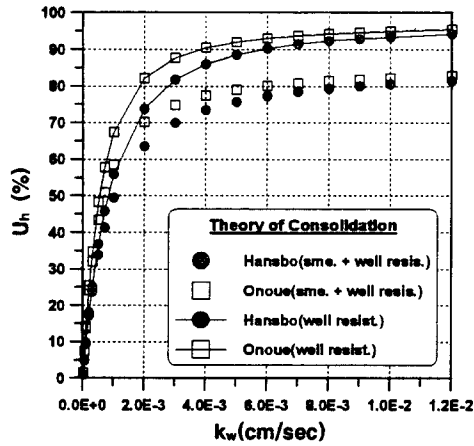


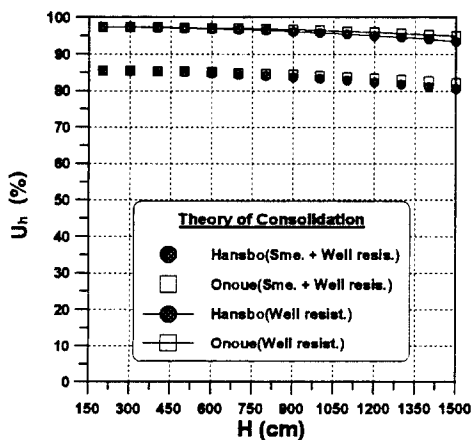
그림. 3 연직배수재의 투수계수( $k_w$ )의 영향

표.4와 그림.4(a)(b)는 점토층 두께(H)의 변화에 따른 두 식의 압밀도를 계산한 결과인데 연직배수재( $k_w$ )가  $10^{-2}$ cm/sec일 때 well resistance만을 고려한 경우(case II)를 이상적인 경우(case III)와 비교할 때 오차가 4%이하로 나타나고 있으나, 교란효과와 well resistance를 같이 고려한 경우(case I)에는 오차가 13%이상 생긴다.

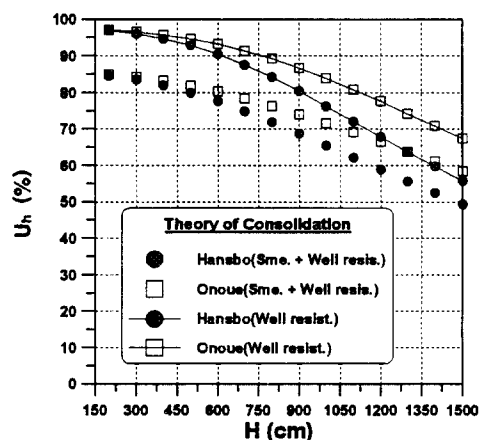
따라서 연직배수재가 양질인 모래( $10^{-2}$ cm/sec 이상)를 사용할시 교란효과에 의한 영향이 지배적이며, well resistance에 의한 압밀지연 효과는 매우적다. Hansbo의 제안식과 Onoue의 제안식에 대해 점토층 두께(H)에 따른 민감성 경향을 분석하기 위해 case I을 점토층 두께의 변화에 따른 압밀도의 오차백분율에 대해 선형회귀분석을 하여 회귀분석식을 도출한 결과를 그림.5(a)(b)에 나타내었다. H = 200cm를 1로 기준하여 점토층을 증가시킬때 연직배수재의 투수성이 다소 작은 모래( $10^{-3}$ cm/sec)인 경우는 Hansbo의 제안식에 의한 결과가 Onoue의 제안식에 의한 결과보다 비교적 큰 증가율을 나타내기 때문에 연약지반의 점토층이 증가할수록 이러한 영향을 감안하여 설계에 반영할 필요가 있다.

표. 4 점토층 두께(H)의 영향

압밀도(%) H(cm)	case I				case II				case III Barron
	Hansbo		Onoue		Hansbo		Onoue		
	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	
500	85.08	80.03	85.23	81.91	97.16	93.01	97.29	97.14	97.53
1000	83.37	65.58	84.12	71.72	95.93	76.39	96.52	83.98	97.53
1500	80.58	49.45	82.29	58.51	93.53	55.91	95.07	67.45	97.53

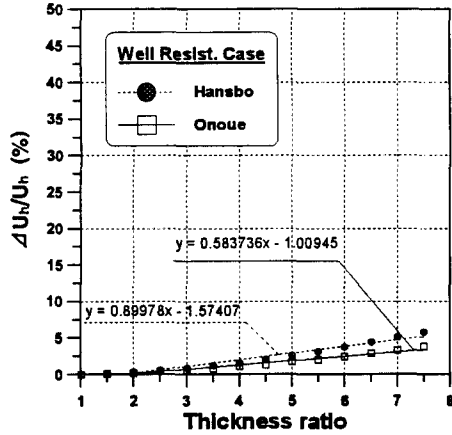


(a) 연직배수재( $k_w = 10^{-2}$ cm/sec)인 경우

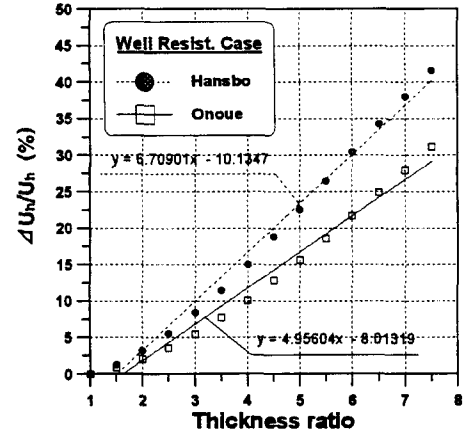


(b) 연직배수재( $k_w = 10^{-3}$ cm/sec)인 경우

그림. 4 점토층 두께(H)의 영향



(a) 연직배수재( $k_w = 10^{-2}$ cm/sec)인 경우



(b) 연직배수재( $k_w = 10^{-3}$ cm/sec)인 경우

그림. 5 점토층 두께(H) 비에 대한 민감도

Hansbo와 Onoue 제안식에 의한 100일 동안 요구되는 압밀도의 계산 결과를 표.5, 그림.6과 표.6, 그림.8에 나타내었다. 두 제안식에 의해 계산된 압밀도 차이는 점토층 두께의 경우와 마찬가지로 양질의 연직배수재인 경우( $10^{-2}$ cm/sec) 두 제안식에 의해 계산된 압밀도가 약간의 차이만을 보이며, 연직배수재가  $10^{-3}$ cm/sec인 경우 교란의 정도가 클수록 압밀도의 차이가 줄어드는 경향을 보이고 있다.

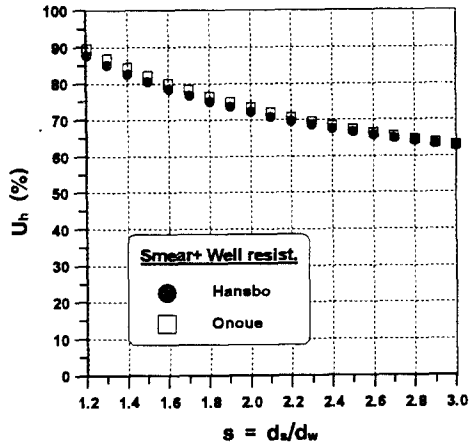
한편, Hansbo의 제안식과 Onoue의 제안식에 대한 교란 효과의 영향을 검토하기 위해 스미어존의 직경비(S)와 투수계수비( $\eta$ )에 따른 민감도의 영향을 살펴 본 결과가 그림.7 과 그림.9에 각각 나타내었다. 그림.7과 그림.9의 결과와 같이 교란효과는 well resistance와는 달리 Onoue가 제안한 식의 결과가 Hansbo가 제안한 식의 결과보다 민감한 반응을 보이며 연직배수재가  $10^{-3}$ cm/sec일 때(그림.7(b), 그림.9(b)) 명확한 경향을 나타내고 있다. 또한, 스미어존의 직경비(S)보다는 투수계수비( $\eta$ )에 대한 민감도가 두 식 모두 더 크게 나타나고 있다.(그림.7과 그림.9 비교 참조)

표. 5 스미어존의 직경비에 대한 영향

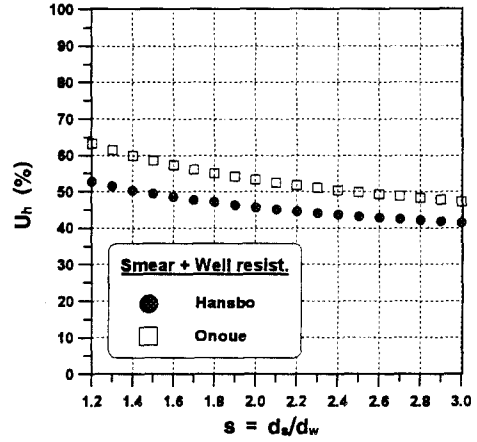
압밀도 (%) $d_s/d_w$	case I			
	Hansbo		Onoue	
	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$
1.2	87.77	52.81	89.59	63.19
1.5	80.58	49.45	82.27	58.51
2	72.24	45.73	73.45	53.31
2.5	66.73	43.26	67.46	49.84
3	62.85	41.49	63.12	47.30

표. 6 스미어존의 투수계수비에 대한 영향

압밀도 (%) $k_b/k_s$	case I			
	Hansbo		Onoue	
	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$
3	87.12	52.49	88.92	62.73
5	80.58	49.45	82.27	58.51
10	66.42	43.13	67.56	49.90
15	55.88	38.20	56.59	43.40
20	48.01	34.26	48.45	38.34

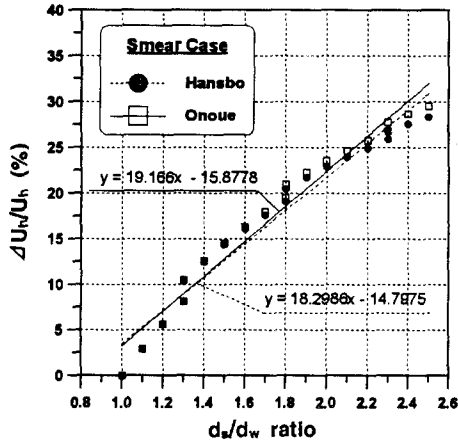


(a) 연직배수재( $k_w = 10^{-2}$ cm/sec)인 경우

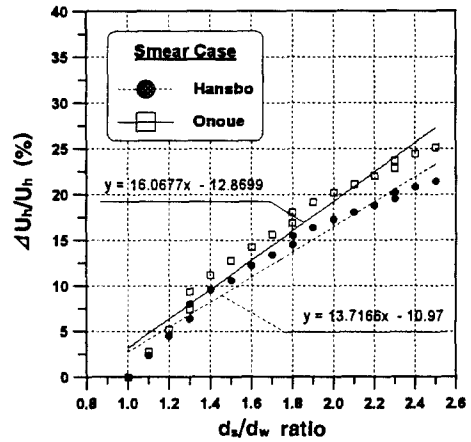


(b) 연직배수재( $k_w = 10^{-3}$ cm/sec)인 경우

그림. 6 스미어존의 직경비( $S = d_s/d_w$ )

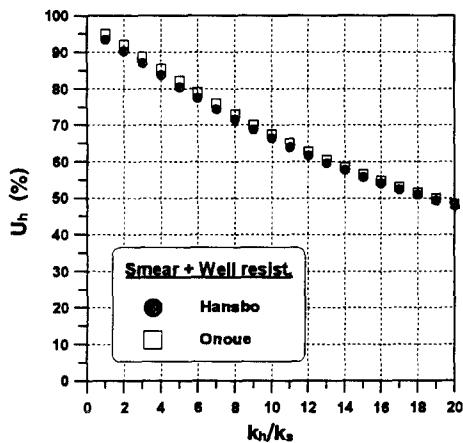


(a) 연직배수재( $k_w = 10^{-2}$ cm/sec)인 경우

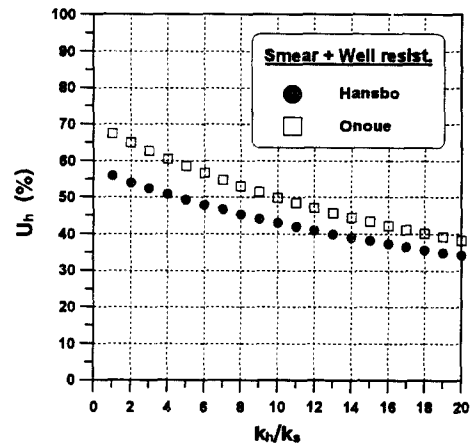


(b) 연직배수재( $k_w = 10^{-3}$ cm/sec)인 경우

그림. 7 스미어존의 직경비( $S = d_s/d_w$ )에 대한 민감도

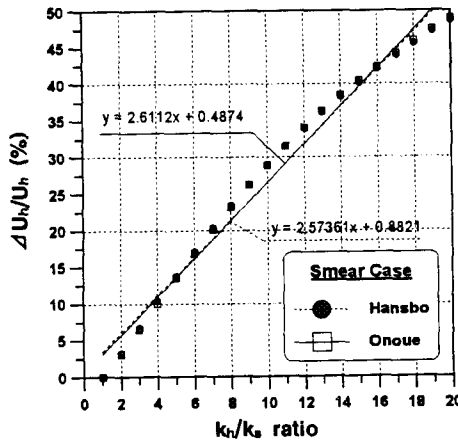


(a) 연직배수재( $k_w = 10^{-2}$ cm/sec)인 경우

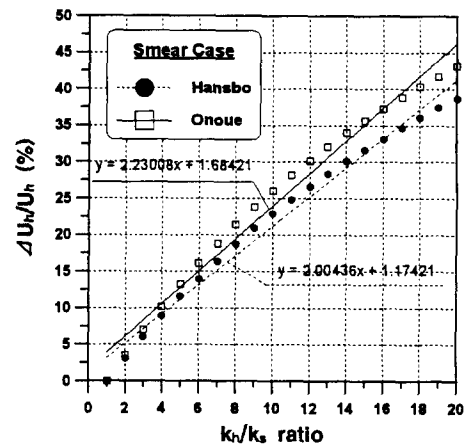


(b) 연직배수재( $k_w = 10^{-3}$ cm/sec)인 경우

그림. 8 스미어존의 투수계수비( $\eta = k_h/k_s$ )



(a) 연직배수계( $k_w = 10^{-2}$ cm/sec)인 경우



(b) 연직배수계( $k_w = 10^{-3}$ cm/sec)인 경우

그림. 9 스미어존의 투수계수비( $\eta = k_h/k_v$ )에 대한 민감도

### 3.3 실측치와의 비교

이 절에서는 연약지반처리(pack drain 공법) 현장계측자료를 이용하여 vertical drain 압밀이론들의 비교·검토를 수행하였으며, 현장계측자료의 신뢰성을 검증하기 위하여 유한차분법 프로그램(TCON)을 추가 비교하였다. 해석을 위한 지반물성치는 표.7과 같고 토층단면은 그림.10에 나타내었다. 그리고, 두 지점의 침하판(A침하판, B침하판)을 선정하여 분석한 결과를 그림.11, 그림.12에 나타내었다.

표. 7 해석에 적용된 매개변수

$k_w = 2.2 \times 10^{-2}$ cm/sec	$k_h = 10^{-9}$ cm/sec
$d_s/d_w = 1.5$	$C_h/C_v = 1$ $k_h/k_v = 5$

먼저 A침하판(그림.11)의 분석결과 성토 초기단계에서의 압밀곡선은 Hansbo의 이론에 의한 침하결과와 Onoue의 이론에 의한 침하 결과가 일치하는 경향을 나타내고 있지만 현장계측자료에 비해 다소 크게 침하를 일으키고 있다. 또한 마지막 성토단계에서 Hansbo 이론에 의한 침하결과가 실측치에 근접하였고 Onoue 이론에 의한 침하결과는 약간의 차이를 보여 전반적인 경향이 Onoue 이론에 의한 침하결과가 현장계측자료와 Hansbo 이론에 의한 침하결과 보다 과대평가 되고 있다.

B침하판(그림.12)에서는 성토 초기단계에서 현장계측치와 이론에 의한 침하양상이 거의 일치하면서 침하가 발생하지만 시간이 경과할수록 이론에 의한 침하의 결과가 크게 나타나고 있다. 적용한 이론 중 Onoue 이론에 의한 침하결과가 Hansbo 이론에 의한 침하결과 보다 실측치와 더 큰 차이를 보이고 있다. 또한 TCON의 해석결과는 실측치보다 약간 크게 나오는 경향은 있지만 거의 일치하고 있다. 본 해석지점의 결과 분석만 놓고 보면 성토 초기단계에서는 Onoue의 이론에 의한 침하결과와 Hansbo의 이론에 의한 침하결과가 거의 일치하는 경향을 보이고 있지만 시간이 경과할수록 Onoue의 이론에 의한 침하는 Hansbo의 이론에 의한 침하결과 보다 큰 침하를 보이고 있다. 이는 3.2절의 연구결과와도 일치한다. 또한 전반적인 침하양상으로 볼 때 Hansbo의 이론에 의해 계산된 침하결과가 실측치에 근접하고 Onoue의 이론에 의해 계산된 침하결과는 다소 과대평가되고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 적용된 Hansbo의 이론과 Onoue 이론의 비교·분석은 향후 더 많은 계측자료와 더 다양한 분석방법을 이용하여 다각적인 검토가 이루어져 실제현장에 부합할 수 있게 적용하여야 할 것으로 판단된다.



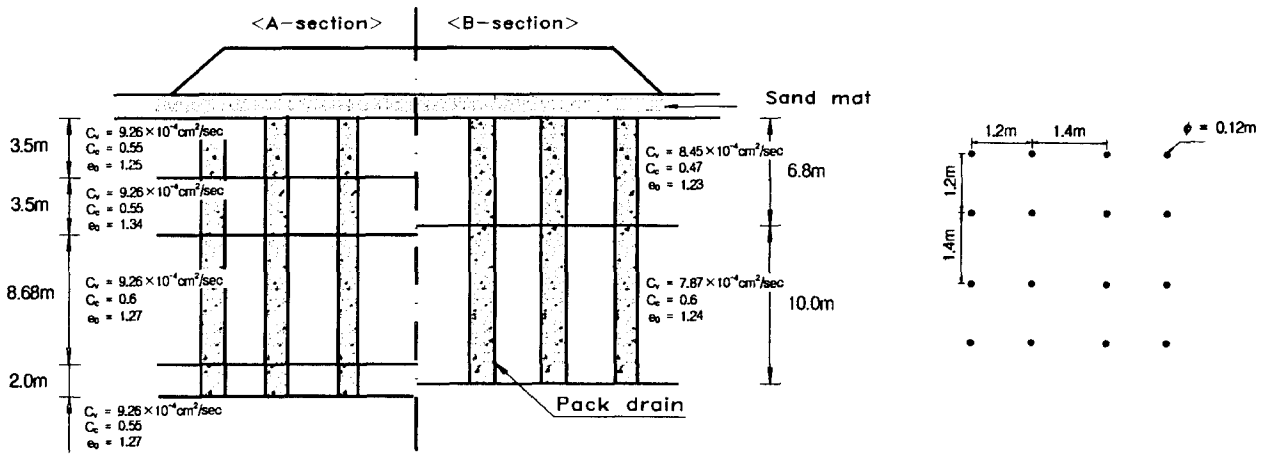


그림. 10 pack drain 배치 및 토층단면

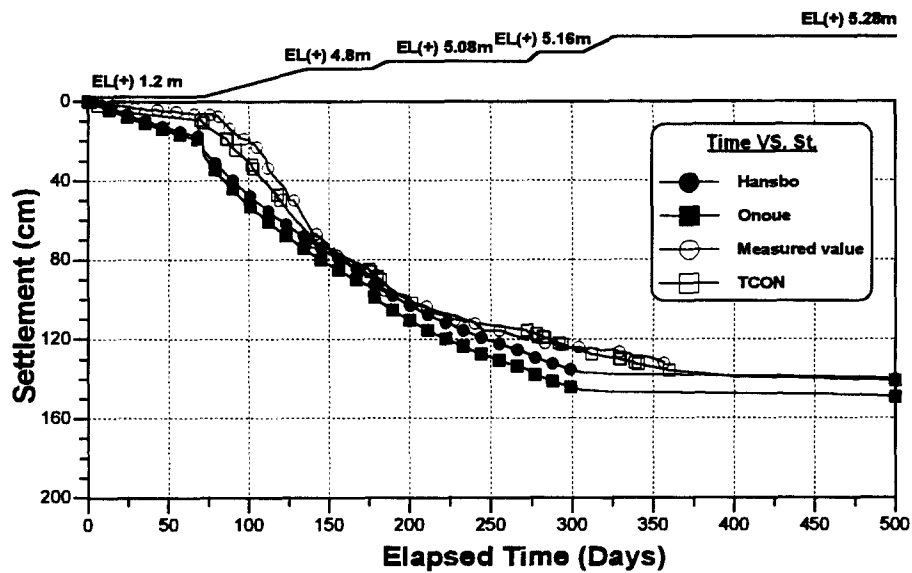


그림. 11 시간 - 침하 곡선 (A침하판)

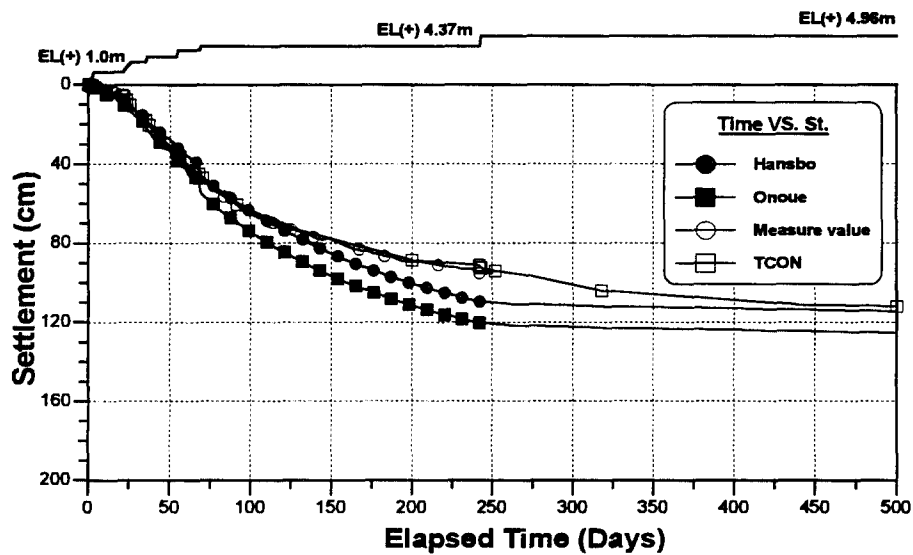


그림. 12 시간 - 침하 곡선 (B침하판)

## 4. 결 론

vertical drain 압밀이론 중 Hansbo의 이론과 Onoue의 이론을 적용하여 공식을 세분하고, 설계에 관련된 변수와 현장실측자료를 이용하여 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Hansbo의 이론식과 Onoue의 이론식의 압밀도 차이는 스미어항에서의 차이는 거의 없고, well resistance 항에 의해 발생된다는 것을 알 수 있다.
- 2) 연직배수재의 투수계수에 따라 그 차이는 다르지만 전반적으로 Onoue의 제안식이 Hansbo의 제안식보다 압밀도가 크게 산정되고 연직배수재로 다소 불량한 모래( $10^{-3}$ cm/sec)를 사용할 경우 압밀도가 대략 10%정도 차이를 보여 과다설계될 우려가 있다. 또한 연직배수재가 양질의 모래( $10^{-2}$ cm/sec이상)일 때 교란효과에 의한 영향이 지배적이며 well resistance에 의한 압밀지연 효과는 매우 적은 것을 두 제안식의 압밀도 계산 결과에 의해 알 수 있다.
- 3) well resistance의 영향에 대한 민감도는 Hansbo의 제안식이 큰 반응을 보였고, 교란효과에 대한 민감도는 Onoue의 제안식이 크게 나타나고 있다.
- 4) 각 이론식과 유한차분법 그리고 실측치를 비교해 본 결과 현장여건을 가장 잘 반영해 주는 것은 유한차분법(TCON)이며, 이론에 의한 침하결과는 성토재하기간에서는 실측치보다 과대평가되지만 방치기간에 접어들면서 실측치에 근접된 양상을 보인다. 특히, Hansbo 이론에 의한 침하결과가 실측치에 더 근접되고 있으며 Onoue의 이론에 의한 침하결과는 다소 과대평가되고 있음을 알 수 있다.

## 참고문헌

1. Barron, R.A. (1948). "Consolidation of Fine - Grained Soils by Drain Wells" , *Trans. ASCE*. 113, No. 2346, pp. 718~742.
2. Hansbo, S.(1979), "Consolidation of clay by band-shaped prefabricated vertical drains" , *Ground Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 21~25.
3. Hansbo, S.(1981), "Consolidation of fine - grained soils by prefabricated drains" , *Proc. XI CSMFE*, Vol. 3, Paper 12/22, Stockholm
4. Johnson, S. T.(1970 a). "Foundation precompression with vertical sand drains" , *ASCE*, Vol. 96, No. SM1, pp. 145~175.
5. Onoue, A.(1988), "Consolidation by Vertical Drains Taking Well Resistance and Smear into Consideration" , *Soil and Foundations*, Vol. 28, No. 4, pp. 165~174.
6. Onoue, A. Ting, N-H., Germaine, J.T. and Withman, R.V.(1991). "Permeability of Disturbed Zone around Vertical Drains" , *Proc. of ASCE Getech. Engng Congress*, Colorado, pp.879~890.