

Rowe cell 투수시험을 통한 샌드드레인의 최적 타설간격 Optimal Spacing of Sand Drains by Rowe cell Permealilty Test

최재순¹⁾, Jae-Soon Choi, 정상섬²⁾, Sang-Seom Jeong, 김수일³⁾, Soo-Il Kim

¹⁾ 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Yonsei Univ.

²⁾ 연세대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Yonsei Univ.

³⁾ 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Yonsei Univ.

SYNOPSIS : In this study, the permeability of marine soil in Youngjong island, Asan and Kwangyang bay area is investigated using Rowe cell testing device. Special attention is given to the estimation of vertical and horizontal permeability with varying surcharge loading and spacings of vertical sand drains, respectively. As a result, the equal-strain consolidation by sand drains that take into account the smear zone is analyzed and compared based on the theories proposed by Barron, Hansbo and Onoue.

The undisturbed samples are chosen from the upper and lower parts of a field boring hole at test sites and Rowe cell permeability tests are carried out with three different confining pressures of 50, 100 and 200 kPa and with varying spacings of vertical sand drains.

Based on the experimental results, it is quantitatively identified that the permeability is increased gradually up to the n (d_e/d_w) values of 4.7-5.8, beyond which it decreased rapidly as the spacings of vertical sand drains increase. The reason for this reduction after reaching its maximum is due to the disturbance effect developed in the mandrel installation processes. It is also identified that the consolidation is accelerated as the n is decreased gradually (i.e., the smaller spacings of vertical sand drains), whereas it is delayed on the contrary in case of sample disturbance developed through installation processes. Based on the results obtained, the optimum spacing for considering smear effect is proposed to design vertical sand drains with n ratios varying from 2 to 10.

KEYWORDS : Rowe cell permeability test, Sand drain, Drain spacing, Horizontal permeability, Consoildation, Smear zone

1. 서론

연약지반 개량공법 중에서 현재 국내에서는 성토에 따른 압밀 침하를 유발하여 소요의 강도를 갖도록 하는 압성토공법을 많이 이용하고 있는데 이 공법에 의한 지반개량시 많은 시간이 소요되므로 샌드드레인, 페이퍼드레인, 플라스틱보드드레인, 팩드레인 등 연직배수재를 병용하여 압밀을 촉진시키고 있다. 특히 연직배수재의 타설시 수평방향의 압밀계수의 추정이 어려워 근사적으로 수직방향의 압밀계수와 동일하게 산정함으로 과다설계를 야기시키고 있는 실정이다.

최근의 연직배수재공법에 대한 연구를 보면 1966년 Rowe는 방사선 방향의 2차원 흐름에 대한 압밀거동을 분석하는 실내시험장치를 연구 개발하였으며 1979년 Singh와 Hattab은 Rowe cell을 이용하여 맨드렐의 타입 및 관입방법과 cell 크기의 변화에 따른 압밀시험을 수행하여 수평방향의 압밀거동은 압밀 특성보다는 교란 및 관입형태와 관입방법에 의해 더 큰 영향을 받는다고 보고하였다. 1979년과 1981년 Hansbo는 샌드드레인의 설치지반을 교란지역과 비교란지역으로 구분하는 2지역 이론을 도입하여

Barron의 식을 수정하였으나 샌드드레인의 투수성이 매우 커서 배수저항의 효과가 무시할 수 있을 만큼 작은 경우에는 정해를 구하기가 어렵다. 1979년 Ignacio Garcia는 실트와 점토의 성분비를 달리하여 간극크기에 따른 투수계수를 산정하였으며 1988년 Onoue는 1974년 Yonshikuni와 Nakanodo가 제안한 배수저항계수를 사용하여 연직배수재가 타설된 다층구조에 있어서의 거동과 교란영향과 배수저항영향을 함께 고려한 간편식을 제안하였다. 1989년 Zeng과 Xie는 교란영역과 비교란영역에서 서로 다른 두 지배방정식을 적용함으로써 전체층에 대한 교란효과와 배수저항효과가 고려된 평균압밀도를 제안하였다. 또한 1991년 Bergado는 교란효과의 영향을 실내 및 현장시험을 통해 확인하였으며 1992년 Hird, Pyrah와 Russell은 평면변형률상태하에서 교란효과와 배수저항을 유한요소법을 이용하여 분석하였고 1993년 Madhav, 박영목과 Miura는 Onoue의 이론을 바탕으로 교란지역, 교란의 전이지역, 비교란지역의 3지역 구분론을 제시하며 지반개량시 배수재의 직경증가에 따른 간격의 조밀성보다 맨드렐의 직경과 타입에 따른 교란영향을 고려하는 것이 더욱 효과적이라고 제안하였다. 국내에서는 1992년 김홍집 등에 의해 샌드드레인 타설시 교란과 배수저항의 영향에 대하여 수치해석적 연구는 수행되어 왔으나 흙의 수평방향 거동에 대한 실험적 연구는 매우 부족한 상태에 있다.

이와 같은 배경에서 본 연구는 샌드드레인을 이용한 연약지반 개량시 타설간격의 변화에 따른 거동을 분석하고자 아산만 포송지구, 영종도, 광양만지역의 원지반에서 불교란시료를 채취하여 Rowe cell을 이용하여 수평방향의 투수계수를 산정하고 이를 토대로 교란을 고려한 Barron, Hansbo, Onoue의 해석으로 샌드드레인의 타설간격 변화에 따른 수평방향 압밀도를 비교 분석하고자 한다.

2. 수평투수계수 및 압밀도 산정이론

수평투수시험은 그림 1에 나타난 바와 같이 수압차에 의하여 흐름이 발생하면 반경 r 인 지점에서 미소부분의 dr 에 대한 유량은 Darcy의 법칙을 적용하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = 2 \pi r H \frac{dh}{dr} k_r \quad (1)$$

여기서, dh/dr 는 동수경사, H 는 시료의 높이를 나타내며 이를 반경 r 과 수두 h 에 대해 적분하면 식 (2)와 같다.

$$k_r(h_2 - h_1) = \frac{q}{2 \pi H} \log_e \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (2)$$

여기서, r_1 과 r_2 는 모래기둥과 시료의 반경, h_1 과 h_2 는 r_1, r_2 일 때의 수두를 의미한다.

압력차와 수두차의 관계는 식 (3)과 같고 이를 식 (2)에 대입하여 식 (4)와 같은 수평투수계수 산정식이 유도된다.

$$\Delta p = \Delta h \rho g = (h_2 - h_1) \rho g \quad (3)$$

$$k_r \text{ (cm/sec)} = 0.26 \left(\frac{q}{H \Delta p} \right) \log_e \left(\frac{D}{d} \right) \times 10^{-6} \quad (4)$$

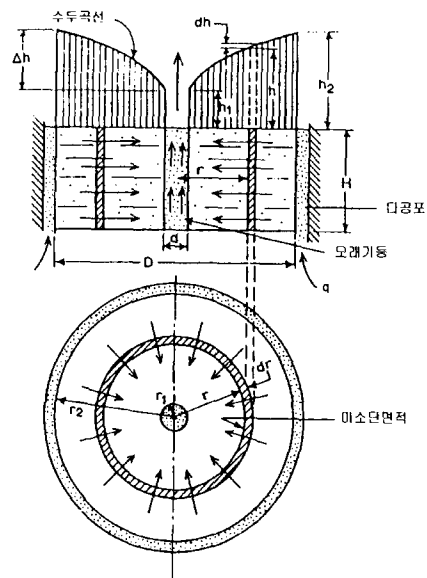


그림 1 모래기둥이 타입된 시료에 있어서 물의 흐름 및 수두차

여기서, ρ 는 시료의 밀도, D 는 시료의 직경, g 는 중력가속도, d 는 모래기둥의 직경, H 는 시료의 높이를 나타낸다. 그림 2는 수평투수시험을 위한 Rowe cell의 실험장치를 보여주고 있고 그림 3은 수평투수시험의 순서도를 나타내고 있다.

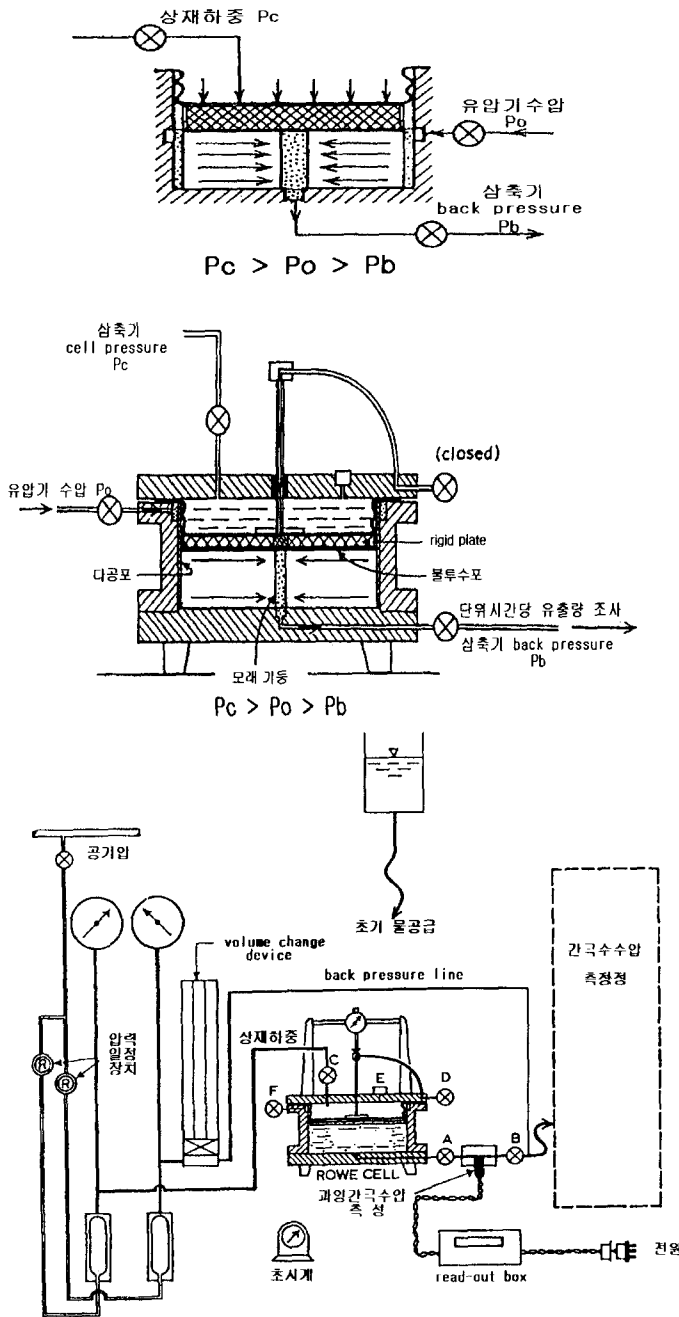


그림 2 Rowe cell 투수시험 개요 및 장치

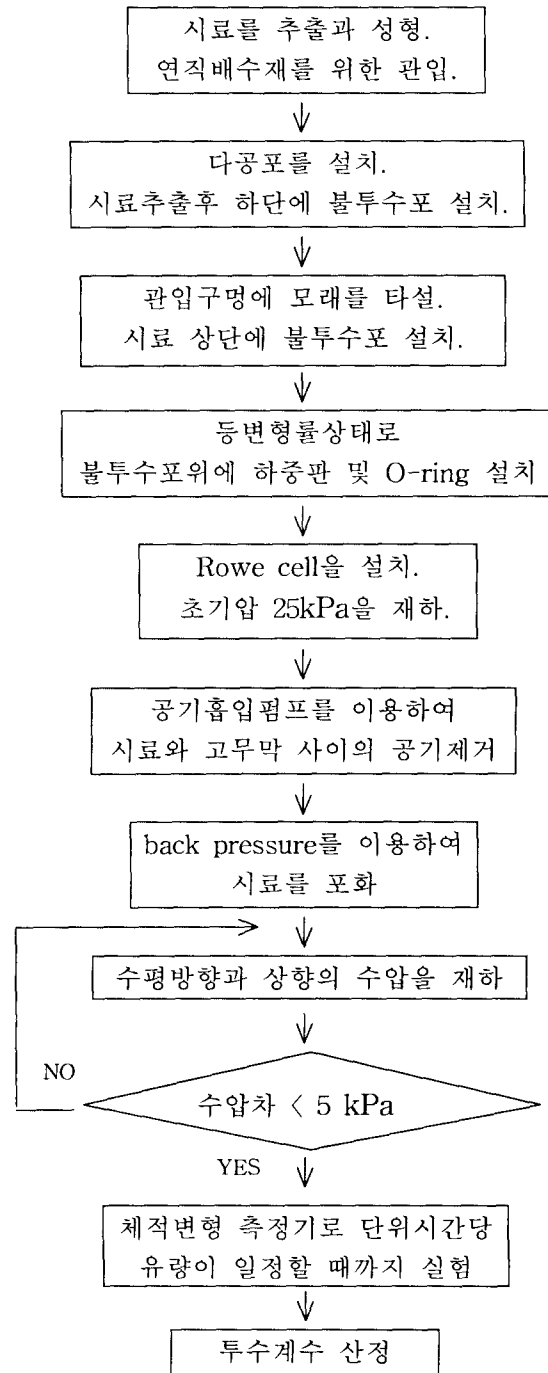


그림 3 수평투수시험 순서도

교란을 고려한 Barron, Hansbo, Onoue 이론에 의한 수평방향 압밀도는 시험결과 산정된 투수계수와 시간계수(T_r)의 변화에 따라 표 1에 나타난 $f(n,s,k')$ 를 식 (5)에 적용하여 나타낼 수 있다.

$$U_r = 1 - \exp\left(\frac{-8T_r}{f(n,s,k')}\right) \quad (5)$$

표 1 교란을 고려한 수평방향 압밀도 분석시 $f(n,s,k')$ 의 비교

구 분	$f(n,s,k')$
Barron	$\frac{n^2}{n^2-s^2} \ln(\frac{n}{s}) - \frac{3}{4} - \frac{s^2}{4n^2} + \frac{k_h}{k_s} (\frac{n^2-s^2}{n^2}) \ln s$
Hansbo	$\frac{n^2}{n^2-1} [\ln \frac{n}{s} + k' \ln s - \frac{3}{4}] + \frac{s^2}{n^2-1} [1 - \frac{s^2}{4n^2}] + \frac{k'}{n^2-1} [\frac{s^4-1}{4n^2} - s^2 + 1], k' = \frac{k_h}{k_s}$
Onoue	$\frac{(n')^2}{(n')^2-1} \ln n' - \frac{3(n')^2-1}{4(n')^2}, (n')^2 = ns^{k'-1}$

3. 물성시험 및 수평투수시험 결과

지역별 불교란시료에 대한 물성시험결과는 그림 4와 표 2와 같다. 물성시험결과, 아산만과 영종도 시료는 함수비, 액성한계, 소성지수, 비중계법을 통한 입도분포에서 서로 비슷한 결과를 나타내고 있으나 광양만 시료의 물성치는 높은 함수비와 주성분이 점토로 균등한 입도를 갖는다는 점에서 전혀 다른 결과를 나타내고 있다. 또한 50, 100, 200 kPa의 상재하중 재하시 맨드렐(mandrel)의 직경을 7, 10, 12, 15, 25cm(n값 : 10, 7, 5.8, 4.7, 2.8)로 변화시켜 수평투수시험을 수행한 결과는 그림 5와 같다.

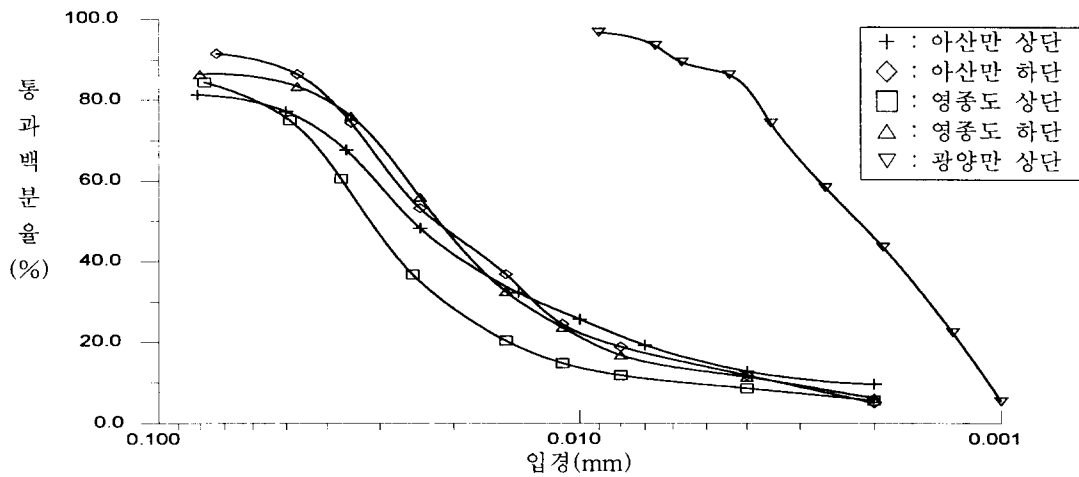
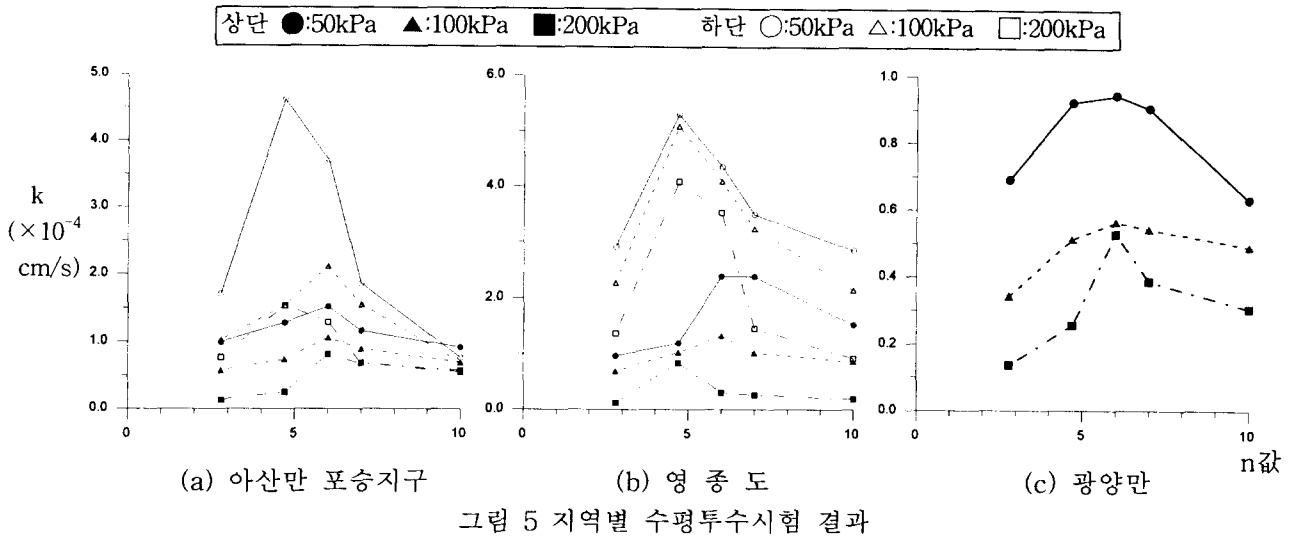


그림 4 비중계법을 이용한 입도분포곡선

표 2 지역별 물성시험 결과

구 분	아산만 포송지구		영종도		광양만 2.4m	
	상단 3.8m	하단 5.4m	상단 4.0m	하단 6.6m		
함수비(%)	37.4	39.4	36.9	32.5	68.2	
비 중	2.64	2.65	2.65	2.64	2.60	
액성한계(%)	34.8	35.6	30.0	31.4	57.7	
소성지수	14.0	14.2	5.1	12.3	31.2	
흙의 분류	CL	CL	CL	CL	CH	
입자 구성	모래(%)	1.5	0.2	1.1	0.4	0
	실트(%)	83.0	84.5	89.9	87.4	0
	점토(%)	15.5	13.3	9.0	12.2	100



수평투수시험결과, 상재하중의 증가에 따라 투수계수는 작아지고 대체적으로 상단보다는 하단의 경우에 투수계수가 작음을 알 수 있었다. 특히, 광양만 시료의 결과는 아산만과 영종도 시료에 비해 작게 산정되었는데 이는 입도분포에 있어서 실트와 점토가 혼합된 아산만과 영종도 시료의 특성과는 달리, 주성분이 점토로서 입도가 균등하고 함수비가 높은 흙의 특성이 투수의 저하에 영향을 준 것으로 판단된다. 배수재 직경(d_w)의 변화에 따른 시험결과, 배수재 직경이 증가(n 값은 감소)함에 따라 투수계수도 증가하여 n 값이 5.8, 4.7일때 최대값을 나타내었으나 그 이상으로 배수재의 직경증가에는 오히려 투수계수값이 작아졌다. 이는 배수재 직경증가에 따른 투수계수의 변화는 n 값(d_c/d_w)이 4~6의 범위에서 투수가 증가되어 최대값을 갖게되나 그 이상의 배수재 직경 증가는 맨드릴 관입시 발생하는 마찰저항으로 인한 교란으로 투수계수가 감소된 것으로 판단된다

4. 수평방향 압밀도 분석

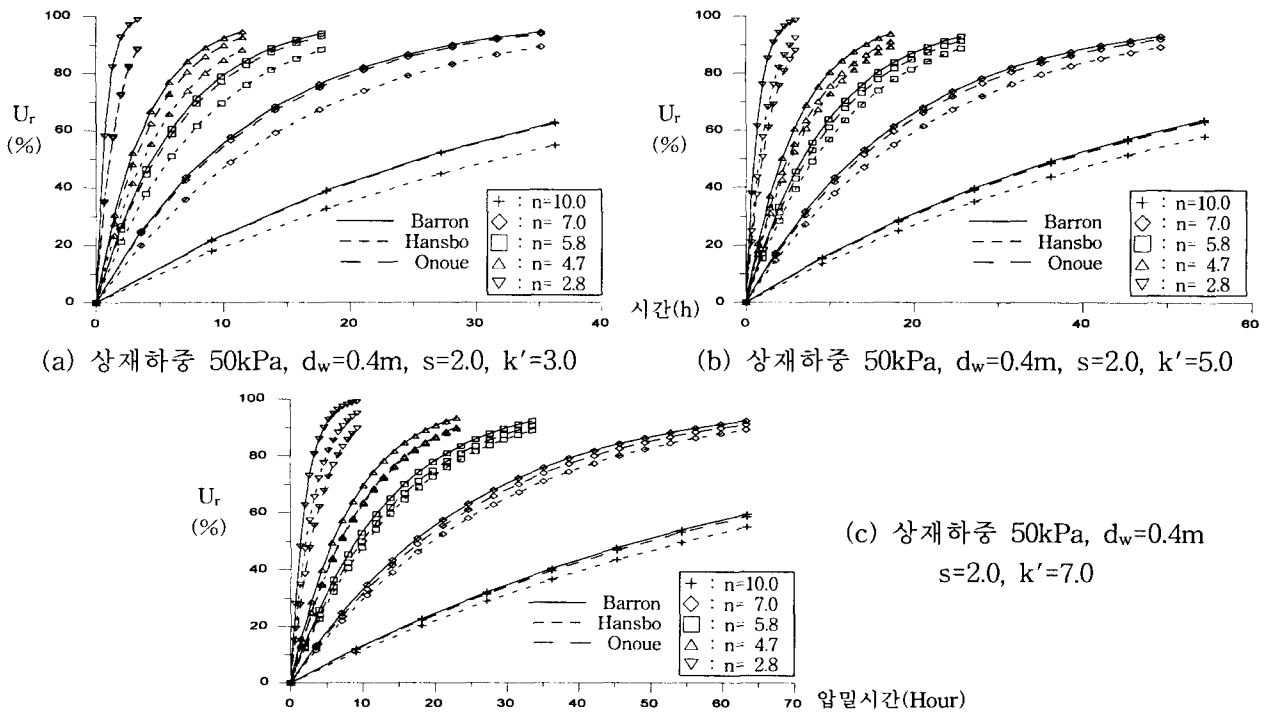
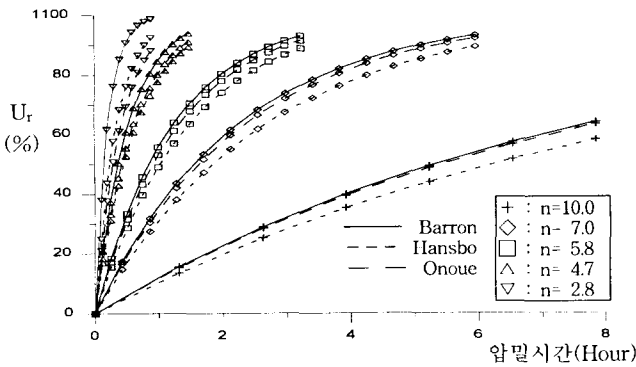
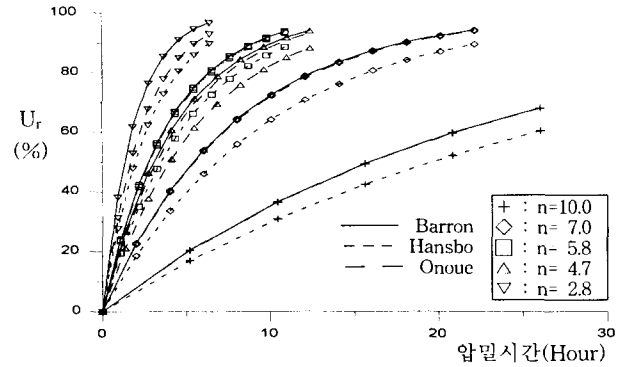


그림 6 투수계수비(k')에 따른 압밀도 분석결과 (아산만 상단)

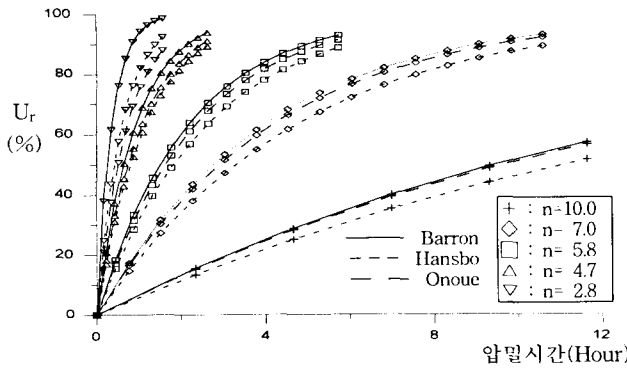
교란을 고려한 수평방향 압밀도 분석에 있어서, 교란영역의 투수계수에 대한 불교란영역의 투수계수의 비(k')는 Onoué가 페이퍼드레인을 대상으로 투수계수의 변화를 시험한 결과를 토대로 3, 5, 7로, 교란지역의 직경비(s)는 Hansbo와 Bergado가 시험을 통해 제안한 값인 1.5~2.0의 범위에서, 샌드드레인 직경의 변화는 시공중에 가장 많이 쓰이는 0.3~0.5m의 범위에서 각각의 값을 변화시켜 분석을 수행하였다. 그 결과는 그림 6~그림 8과 같다.



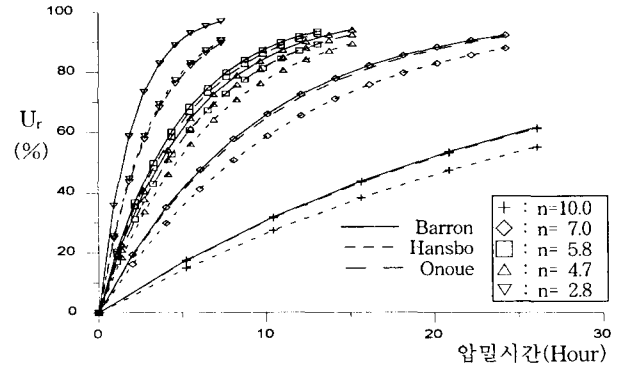
(a) 상재하중 100kPa, $s=2.0$, $k'=5.0$
 $d_w = 0.3m$



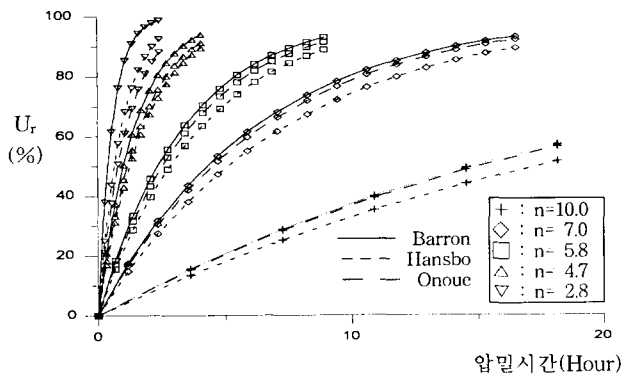
(a) 상재하중 200kPa, $d_w=0.4m$, $k'=5.0$
 $s = 1.5$



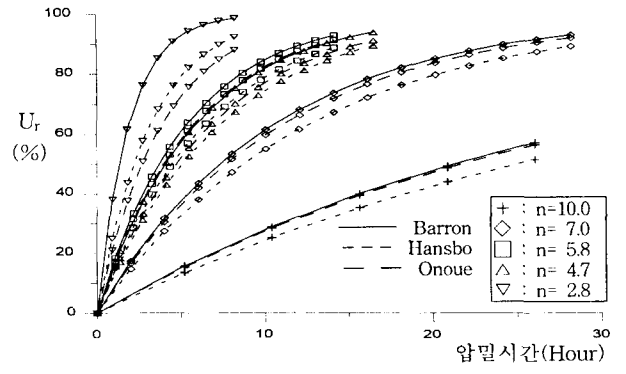
(b) 상재하중 100kPa, $s=2.0$, $k'=5.0$
 $d_w = 0.4m$



(b) 상재하중 200kPa, $d_w=0.4m$, $k'=5.0$
 $s = 1.75$



(c) 상재하중 100kPa, $s=2.0$, $k'=5.0$
 $d_w = 0.5m$



(c) 상재하중 200kPa, $d_w=0.4m$, $k'=5.0$
 $s = 2.0$

그림 7 배수재 직경(d_w)에 따른 압밀도 분석결과
(영중도 상단)

그림 8 교란지역비(s)에 따른 압밀도 분석결과
(광양만 상단)

샌드드레인의 타설간격(n)을 변화에 따른 압밀도를 분석한 결과, 아산만 하단과 영종도 상단에서는 샌드드레인의 타설간격이 감소(n 값이 감소)할수록 압밀이 촉진되었다. 그러나 광양만 시료에 있어서는 n 값이 5.8일 때가 4.7일 때보다 압밀시간이 단축되어 나타났다. 이는 전반적인 수평투수시험결과, 교란의 증가에 따른 투수저하에도 불구하고 샌드드레인의 타설간격이 좁아짐에 따라 압밀이 촉진된 것과는 달리, 그림 5의 수평투수시험결과에서 나타난 바와 같이 n 값이 4~6에서 교란으로 인한 급격한 투수저하가 발생한 경우에는 타설간격이 좁아짐에 따른 압밀촉진에 크게 영향을 주게 되어 압밀이 지연된 것으로 판단된다. 또한, n 값 2.8로 샌드드레인의 타설간격을 산정한 경우에는 대체적으로 교란에 의해 투수계수가 작음에도 불구하고 샌드드레인의 타설간격이 매우 좁아짐에 따른 압밀촉진으로 압밀시간이 가장 단축됨을 알 수 있었다.

투수계수비(k')를 3.0~7.0까지 변화시켜 압밀도를 분석한 결과, 투수계수비(k')가 증가할수록 압밀시간이 지연되고 있는데 이는 교란지역의 투수계수가 불교란지역의 투수계수보다 크게 감소됨에 따른 압밀지연현상으로 판단된다. 또한, 전반적으로 국내 시공현장에서 많이 쓰고 있는 샌드드레인의 직경(d_w)인 40cm를 기준으로 30, 40, 50cm로 변화시켜 수치해석한 결과, 샌드드레인의 직경은 압밀시간의 제곱근에 비례하므로 직경이 작을수록 압밀시간이 단축되었고 교란영역비(s)를 1.5~2.0의 범위로 변화시켜 압밀도를 분석한 결과, 교란영역이 증가에 따라 압밀이 지연되나 그 영향이 투수계수비나 샌드드레인의 직경에 따른 영향보다 미비한 것으로 나타났다.

5. 결론

Rowe cell을 이용하여 아산만, 영종도, 광양만 지역에서 채취한 불교란시료를 대상으로 수평투수시험을 수행한 결과, 상재하중의 증가에 따라 투수계수가 감소하였고 배수재직경(d_w)의 증가에는 투수계수가 증가하여 대체적으로 n 값 4~6의 범위에서 최대값을 나타낸 후 감소하는 경향을 보였다. 이로써 배수재 타입시 발생하는 교란현상이 투수계수에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있었다.

교란을 고려한 Barron, Hansbo, Onoue의 이론을 적용하여 수평방향 압밀도를 분석한 결과, 전반적으로 n 값의 감소 즉 샌드드레인의 타설간격이 좁아짐에 따라 압밀이 촉진되는 것으로 나타났으나 교란이 매우 크게 발생하여 투수를 크게 저하시킨 경우에는 타설간격이 좁아짐에도 불구하고 압밀이 지연됨을 알 수 있었다.

본 연구결과, 샌드드레인의 타설에 있어서 수평배수에 따른 압밀촉진현상은 샌드드레인의 타설간격 및 직경뿐 만 아니라 샌드드레인의 타입시 발생하는 교란을 고려하여 시공하여야 경제적으로 지반개량 효과를 최대화할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 참고문헌

- 1) Rowe, P. W. and Barden, L., "A New Consolidation Cell", *Geotechnique*, Vol.16, No.2, 1966, pp.162-169.
- 2) Yonshikuni, H., and Nakanodo, H., "Consolidation of Soils by Vertical Drain Wells with Finite Permeability", *Soils and Foundations*, JSSMFE, Vol.14, No.2, 1974, pp.35-46.
- 3) Singh, A. P. and Hattab, T. N., "A Laboratory Study of Efficiency of Sand Drains in relation to Methods of Installation and Spacing", *Geotechnique*, Vol.29, No.4, 1979, pp.395-422.
- 4) Hansbo, S., "Consolidation of Clay by Band-Shaped Prefabricated Drains", *Ground Engineering*, Vol.12, No.5, 1979, pp.59-66.
- 5) Onoue, A., "Consolidation of Multilayered Anisotropic Soils by Vertical Drains with Well Resistance", *Soils and Foundation*, JSSMFE, Vol.28, No.3, 1988, pp.75-90.
- 6) Onoue, A., "Consolidation by Vertical Drains taking Well Resistance and Smear into Consideration", *Soils and Foundation*, JSSMFE, Vol.28, No.4, 1988, pp.165-174.

- 7) Zeng, G. X., and Xie, K. H., "New Development of the Vertical Drain Theories", *Proc. 12th ICSMFE*, Vol.2, 1989, pp.1435-1438.
- 8) Bergado, D. T., Asakami, H., Alfaro, M. C., and Balasubramanian, A. S., "Smear Effects of Vertical Drains on Soft Bangkok Clay", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.117, No.10, 1991, pp.1509-1530.
- 9) Garcai-Bengochea, I., Lovell, C. W. and Altschaeffl, A. G., "Pore Distribution and Permeability of Silty Clays", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.105, No.7, 1991, pp.839-856.
- 10) Hird, C. C., Pyrah, I. C. and Russel. D., "Finite Element Modelling of Vertical Drains beneath Embankments on Soft Ground", *Geotechnique*, Vol.42, No.3, 1992, pp.499-511.
- 11) Madhav, M. R., Park, Y. M. and Miura, N., "Modelling and Study of Smear Zones around Band Drains", *Soils and Foundations*, JSSMFE, Vol.33, No.4, 1993, pp.135-147.