한국지반환경공학회 논문집 제4권 제4호 2003년 12월 pp. 17~23

실내모형실험에 의한 Plastic Board Drain이 적용된 연약지반의 압밀거동에 관한 연구

Study on Consolidation Behaviors of Soft Ground by Plastic Board Drain Using Model Tests

유승경* · 홍원표** · 윤길림***
You, Seung-Kyong · Hong, Won-Pyo · Yoon, Gil-lim

Abstract

Accurate prediction of consolidation behaviors of the soft ground improved by plastic board drains is not easy because the consolidation characteristics of the improved ground has not been fully elucidated yet. The shape of drains is one of the most important factors which affect the consolidation characteristics of the improved ground. In this paper, a series of model consolidation tests of soft clay ground improved by plastic board drain were carried out, in order to investigate the effect of both plastic board width and stress level on consolidation characteristics of the improved ground. As the results, behaviors of both settlement and excess pore pressure dissipation were elucidated. Also, the non-uniform distribution of water content in the model ground was obtained. Then, in order to investigate the effect of vertical drainage on the consolidation behavior in the model tests, the comparison between experimental consolidation behaviors and Barron's theoretical ones were carried out. As the results, it was elucidated that the consolidation behavior in the model tests was affected not only by radial drainage but also by vertical drainage.

Keywords : Plastic board drain, Soft clay ground, Consolidation behavior, Model test, Ground improvement

요 지

플라스틱보드드레인(PBD)공법에 의해 개량된 연약점토지반의 압밀특성은 아직 충분히 밝혀져 있지 않기 때문에 개량지반의 압밀거동을 정확히 예측하기는 어려운 실정이다. PBD공법에 사용되는 배수재의 형상은 개량지반의 압밀특성에 영향을 미치는 중요한 인자중의 하나로 알려져 있다. 본 연구에서는PBD공법에 의해 개량된 연약지반의 압밀특성에 미치는 배수재의 폭과 재하중 상태의 영향을 고찰하기 위하여 일련의 실내모형실험을 실시하였다. 모형실험의 결과로부터 모형지반의 침하 및 과잉간극수압의 소산거동과, 모형지반내의 함수비 분포형상을 파악할 수 있었다. 그리고 모형실험결과에 미친 모형지반 상부의 배수조건의 영향을 검토하기 위해서 Barron의 이론해에 의한 압밀거동과 비교, 고찰하였다. 그 결과 모형실험에 의한 압밀거동은 방사방향의 배수조건 뿐만 아니라 연직방향 배수조건으로부터도 영향을 받았음을 알 수 있었다.

주요어 : 플라스틱보드드레인, 연약점토지반, 압밀거동, 모형실험, 지반개량

* 정회원 · 한국해양연구원 연안항만공학연구본부 위촉선임연구원
** 정회원 · 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수
*** 정회원 · 한국해양연구원 연안항만공학연구본부 선임연구원

1. 서 론

양질의 천연모래를 배수재로 사용하는 샌드드레인(SD) 공법은 연약점토지반의 압밀촉진공법으로써 가장 일반적으로 사용되고 있는 공법이다. 그러나 최근 국제적으로 대두되고 있는 환경보호문제로 인해 천연모래의 채취가 제한되고 있는 실정이다. 따라서 배수재로써 모래와 같은 자연재료 대신 인공재료를 사용하는 압밀촉진공법이 다수 제안되고 있다. 그 중에서도 플라스틱으로 제작된 다공질 배수재를 사용하는 플라스틱보드드레인공법(PBD공법)은 연약지반의 압밀촉진공법 중 유용한 공법중의 하나이다. PBD공법의 적용과 보급이 진행되어 오면서 그 적용성이나 유효성에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며, 또한 그 설계법이나 시공법의 개선도 이루어져 왔다. 그러나, PBD공법에 의해 개량된 연약점토지반의 압밀거동은 그 메커니즘이 상당히 복잡하기 때문에 설계법 또한 복잡화되고 있으며, 실제의 현장에서는 설계법에 의해 예측된 소정의 개량효과를 얻을 수 없는 경우가 다수 보고되고 있는 실정이다(柳 承庚, 2002).

본 논문에서는 PBD에 의한 압밀촉진효과를 정량적으로 예측하는 방법을 확립하기 위한 연구의 일환으로, PBD가 설치된 연약점토지반의 압밀거동에 대한 일련의 실내모형실험을 실시하였다. 모형실험에서는 몇 가지의 재하압력과 PBD폭을 상정하여, 모형지반에 재하되는 하중과 그에 의해 발생하는 압밀침하와 과잉간극수압을 측정하였다. 또한, 압밀 종료 후 모형지반의 함수비를 측정하여 그 분포특성을 파악하였다. 한편, 모형실험과 동일한 재하압력과 PBD폭에 대한 압밀거동을 Barron의 이론해를 이용하여 재현하였으며, 그 결과들을 비교, 고찰함으로써 본 모형실험의 결과를 재평가 하였다.

2. 모형실험개요

그림 1은 모형실험에 사용한 모형토조와 계측기의 설치위치를 나타내고 있다. 모형실험장치는 내경 280mm, 높이 300mm의 원형토조와 연직재하장치 및 계측장치들로 이루어져 있다. PBD는 복합구조 일체형이며, 코아부분은 폴리프로필렌(Polypropylene)계 플라스틱으로 만들어져 있고 그 양면에는 부직포의 필터가 부착되어 있다(사진 1참조). 모형지반에 대한 재하로 인해 점토로부터 PBD로 모이는 간극수는 재하판과 점토사이에 설치한 상면배수재를 통하여 재하판의 직경 2mm의 다수의 배수구멍으로 배수된다. 따라서, 모형지반의 상면은 배수조건이며 저면은 비배수조건이다. 모형지반의 압밀거동에 미치는 상면으로부터의 배수영향을 가능한 적게 하기 위해서는 모형지반의 깊이를 깊게하여 상면까지의 배수거리를 멀게 하는 것이 바람직하다고 판단되지만, 이러한 경우에는 모형지반의 침하에 따른 PBD의 과대한 휨 현상과, 모형토조에 수회에 걸쳐 점토를 충진함으로 인해 발생하는 점토지반의 불균질성의 문제가 생기게 된다. 따라서 본 실험에서는 그림 1에 나타낸 바와 같은 모형실험 규격을 결정하였다.

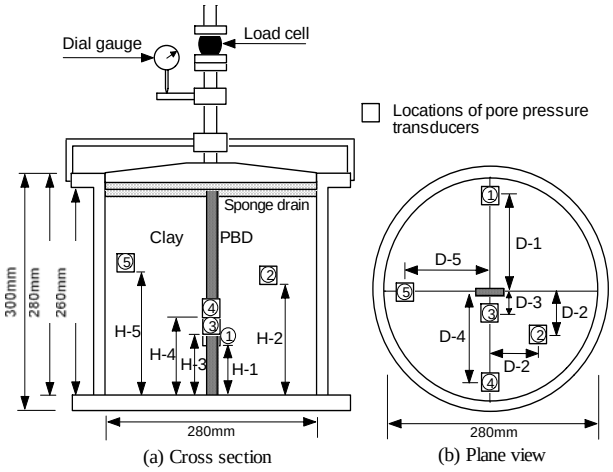

그림 1. 모형토조와 계측기의 설치위치

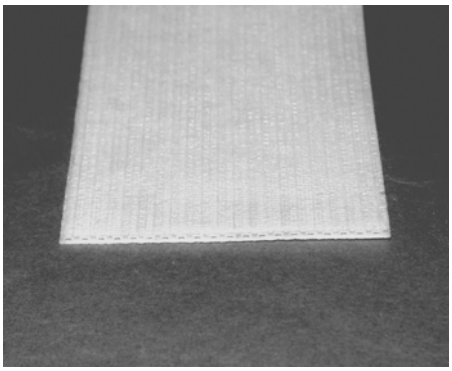

사진 1. 모형실험에 사용한 PBD재

표 1은 모형실험에 사용한 점토의 물리특성을 나타내고 있다. 모형실험에서는 시판의 카오린(Kaolin) 점토를 사용하였으며, 이 점토는 통일분류법에 의하면 소성과 압축성이 큰 점토로 분류된다(Oda, et al, 2001).

표 1. 점토의 물리특성

G_s	W_L	W_P	I_p	C_c
2.62	82.6%	28.6%	54.0	0.87

한편, 모형지반은 PBD가 미리 설치된 모형토조에 액성한계의 약 2배에 해당하는 150%의 함수비로 반죽된 점토를 약 280mm의 두께가 되도록 충진하고, 재하압 9.8KPa에 의한 예비압밀을 실시함으로써 제작하였다. 점토를 충진할 때 표 2에 나타낸 바와 같은 위치에 5개(No.①~No.⑤)의 간극수압계(BP-500RGS)를 설치하였다. 또한, 모형지반에 대한 재하 하중과 지표면의 침하량의 계측은 각각 로드셀(LTZ-1TA)과 다이얼게이지에 의해 계측하였다.

모형지반내의 함수비 분포특성을 조사하기 위해, 모형지반의 1차압밀이 종료된 시점에서 23개소의 시료를 채취하여 함수비를 측정하였다. 사진 2는 함수비 측정을 위한 시료채취의 위치를 나타내고 있다. 시료는 직경 20mm, 길이 250mm의 동파이프를 이용하여 채취하였으며, 모형실험에서의 상면배수에 의한 영향을 피하기 위해 모형지반의 저면에 해당하는 점토시료를 취하여 함수비를 측정하였다.

표 3은 실험조건을 나타내고 있다. 본 실험에서의 PBD의 폭은 일반적인 실무에서의 시공조건(폭 100~200mm, 타설간격 1~2m)을 참고하여, 본 실험에서 사용한 토조의 직경 280mm에 대응하는 범위에서 20mm, 30mm 및 50mm인 세가지 경우에 대하여 실시하였다. 한편, 각각의 시리즈에서는 98.0KPa의 재하응력에 도달하기까지 3단계로 나누어서 단계재하를 실시하였다.

표 2. 간극수압계의 설치위치

(단위:mm)

Test series	H-1	H-2	H-3	H-4	H-5	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5
W-2	70	140	65	90	160	130	60	10	130	130
W-3	70	130	65	100	140	130	60	10	130	130
W-5	70	120	65	90	150	130	60	10	130	130

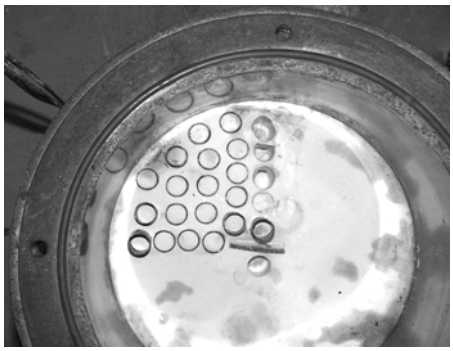

사진 2. 함수비 측정을 위한 시료채취

표 3. 실험조건

Test Series	PBD Width (mm)	Test Case	Loading Stage	Pressure Before Applying Surcharge (KPa)	Total Surcharge (KPa)	Incremental Pressure (KPa)	Initial Height of Model Ground (mm)	Initial Water Content (%)
W-2	20	W-2-04	1	9.8	39.2	29.4	273	144
		W-2-07	2	39.2	68.6	29.4		
		W-2-10	3	68.6	98.0	29.4		
W-3	30	W-3-04	1	9.8	39.2	29.4	275	140
		W-3-07	2	39.2	68.6	29.4		
		W-3-10	3	68.6	98.0	29.4		
W-5	50	W-5-04	1	9.8	39.2	29.4	274	142
		W-5-07	2	39.2	68.6	29.4		
		W-5-10	3	68.6	98.0	29.4		

3. 모형지반의 압밀거동

3.1 침하량의 경시변화

그림 2는 모형실험에 의한 지표면 침하량의 경시변화를 나타내고 있다. 모든 경우에서 재하단계가 낮을수록 큰 침하량이 발생되고 있으며 압밀시간이 길게 나타나고 있다.

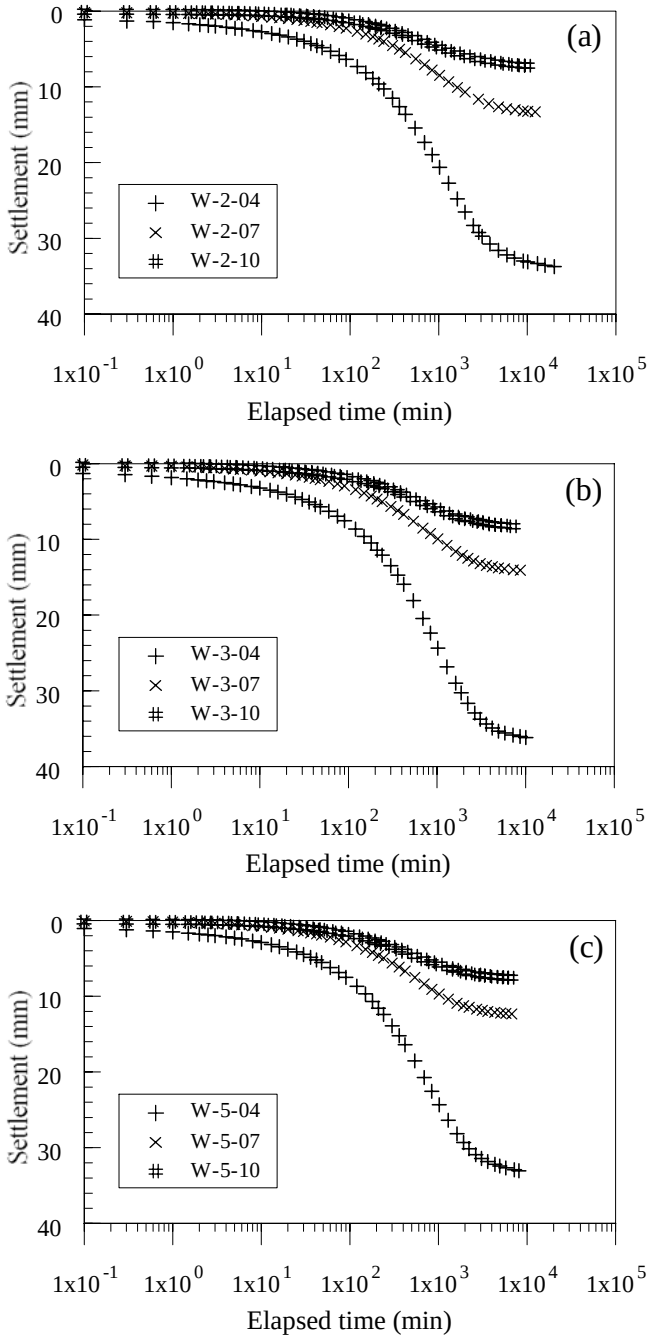

그림 2. 침하량의 경시변화

그림 3은 재하압력과 모형지반의 연직변형량의 관계를 나타내고 있다. PBD의 폭에 관계없이 재하압력이 동일한 경우는 거의 동일한 침하량이 발생되고 있음을 알 수 있다.

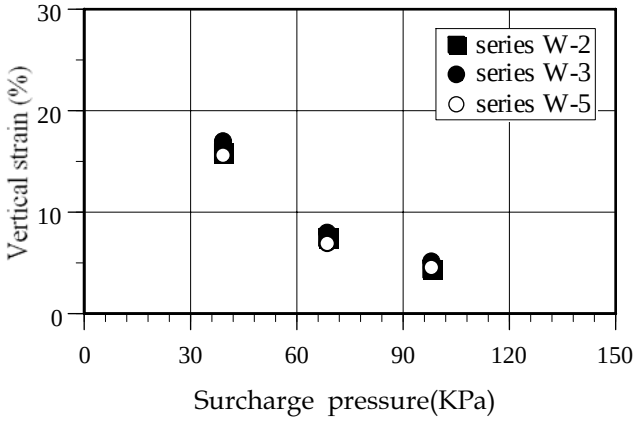

그림 3. 재하압력과 연직변형량의 관계

3.2 과잉간극수압의 경시변화

그림 4는 PBD폭이 30mm인 경우의 모형지반 중의 과잉간극수압 경시변화를 나타내고 있다. 단, 모형실험결과는 모형지반의 침하에 따른 간극수압계의 설치위치 변화에 대한 영향을 받고 있으리라 판단된다. 모형실험에서는 재하압력을 순간적으로 재하했음에도 불구하고 재하 직후의 과잉간극수압의 증가는 보이지 않고, 재하 후 약 10분까지 서서히 증가하는 즉, 간극수압계의 반응이 지연되는 현상이 관찰되었다. 이것은 모형지반과 간극수압계에 미소량의 기포가 존재하여 완전하게 포화되지 못했기 때문이라고 판단된다. 재하 후 약 10분 이후의 과잉간극수압의 경시변화를 살펴보면, PBD에 가장 근접한 위치의 간극수압계 No. ③은 과잉간극수압의 발생량이 작으며, 약 1000분까지는 그 소산도 비교적 빠르게 나타나고 있지만, 그 외 4개의 간극수압계에 의해 측정된 과잉간극수압의 경시변화는 큰 차이 없이 일치하고 있다. 또한, 약 1000분 이후의 모든 과잉간극수압의 소산거동은 거의 일치하고 있다.

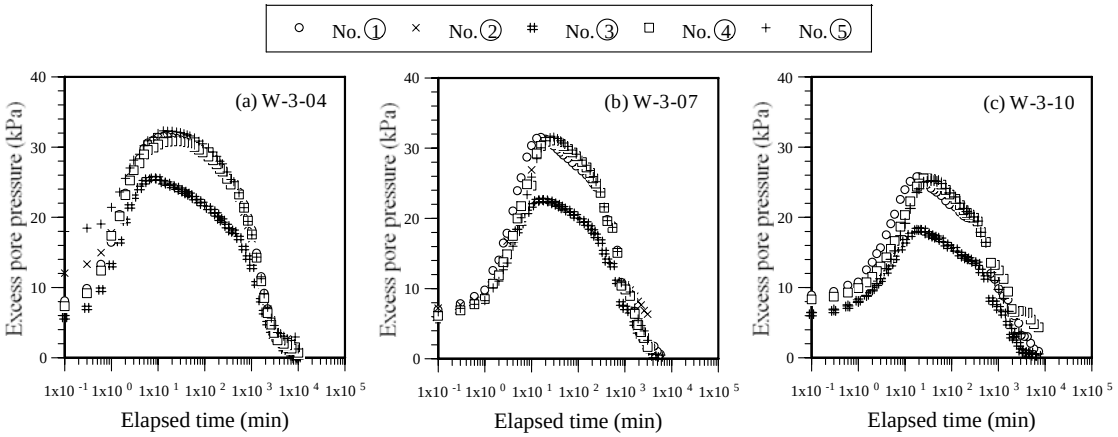

그림 4. 과잉간극수압의 경시변화

3.3 함수비의 분포특성

그림 5는 PBD폭이 50mm인 경우에 대하여 1차압밀 종료 후 측정한 모형지반 저면의 함수비 분포를 나타내고 있다. 이 경우의 모형지반 초기함수비는 142%로 측정되었다. 모형지반의 함수비는 63%~69%의 범위에서 PBD로부터 멀어질수록 그 값이 증가하고 있다. 따라서, 모형지반 중의 간극비는 PBD에서 가까울수록 작음을 알 수 있으며, 모형지반은 불균질한 간극상태에 있음을 알 수 있다.

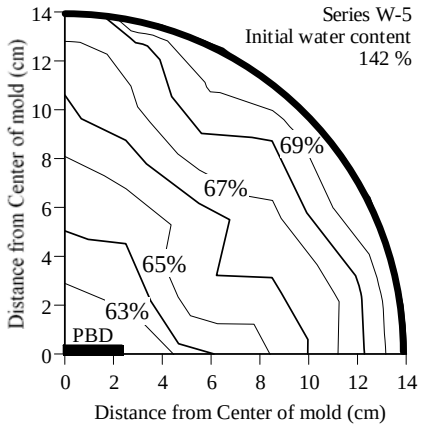

그림 5. 모형지반의 1차압밀종료 후 함수비 분포

4. 모형실험의 재평가

본 연구에서 실시한 모형실험결과를 재평가하기 위해 모형실험과 동일한 재하압력과 PBD폭에 대한 압밀거동을 Barron의 이론해(Barron, 1948)를 이용하여 재현하였다. 이론해에 의한 모형지반의 평균압밀도는 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$U = 1 - \frac{\bar{u}}{u_o} = 1 - e^{-8T_h/F(n)} \tag{1}$$

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

$$n = \frac{d_e}{d_w} \tag{3}$$

$$T_h = \frac{k_h}{m_v \gamma_w}\frac{t}{d_e^2} = \frac{c_h}{d_e^2}t \tag{4}$$

여기서 $\bar{u}$ 와 u_o 는 과잉간극수압의 평균과 초기값을 나타내며, d_e 와 d_w 는 드레인에 의한 간극수 집수원의 직경과 등가경을 나타낸다. T_h 와 k_h 는 간극수의 방사방향흐름에 대한 압밀시간계수와 투수계수를 나타내고 있고, m_v 와 c_h 는 체적압축계수와 압밀계수를 나타내고 있다. 그런데 일반적으로 점토의 투수계수는 간극비에 의존함을 알 수 있다. 따라서, k_h 값은 다음과 같은 식으로 산정하였다(Tavenas, et al, 1983).

$$k_h = k_o \exp\left(\frac{e - e_o}{C_k}\right) \quad (5)$$

여기서 k_o 및 e_o 는 소정의 초기상태에 대한 투수계수와 간극비를 나타내며, C_k 는 표준압밀시험의 결과로부터 얻은 투수계수 변화지수이고, e 는 모형실험의 각 재하단계에서의 초기간극비를 나타내고 있다. Barron의 이론해에 사용되는 체적압축계수는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$m_v = -\frac{\Delta\varepsilon}{\Delta p} = \frac{1}{1+e_0} \cdot \frac{\Delta e}{\Delta p} \quad \left(\because \Delta\varepsilon = -\frac{\Delta e}{1+e_0}\right) \quad (6)$$

여기서 $\Delta\varepsilon$ 와 Δp 는 연직변형량증분과 재하압력증분을 나타낸다. 또한 Barron의 이론해에 사용되는 등가경 d 는 폭 b 와 두께 t 의 규격을 갖는 판상드레인에 대하여 다음과 같은 식으로 산정하였다(Hansbo, 1981).

$$d = \frac{2(b+t)}{\pi} \quad (7)$$

그림 6은 모형실험결과로부터 얻은 모형지반의 평균적 압밀도 즉, 침하량으로부터 산정한 압밀도(U_s)와 Barron의 이론해로부터 얻은 압밀도의 경시변화를 나타내고 있다. 여기서 U_s 는 다음과 같은 식으로 정의하였다.

$$U_s(\%) = \frac{s_t}{s_f} \times 100 \quad (8)$$

여기서, s_t 와 s_f 는 각각 임의의 시간 t 와 압밀종료시의 침하량을 나타낸다. 모든 재하압력의 조건에서 모형실험과 Barron의 이론해에 의한 모형지반의 평균적 압밀진행 속도는 PBD폭이 넓을수록 빠르게 나타남을 알 수 있다. 한편, 모형실험에서의 압밀진행은 Barron의 이론해로부터 얻은 압밀거동보다 빠르게 나타나고 있다. 이는 모형실험과 Barron의 이론해에 적용한 배수조건의 차이에 의한 결과라고 판단된다. 즉, 모형실험에서는 모형지반의 상면과 동시에 PBD와 접하는 부분을 배수조건으로 하고 있는 반면, Barron의 이론해에서는 PBD와 접하는 부분만을 배수조건으로 하고 있다. 따라서, 모형실험에 의한 모형지반의 평균적 압밀거동은 상면 배수조건의 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

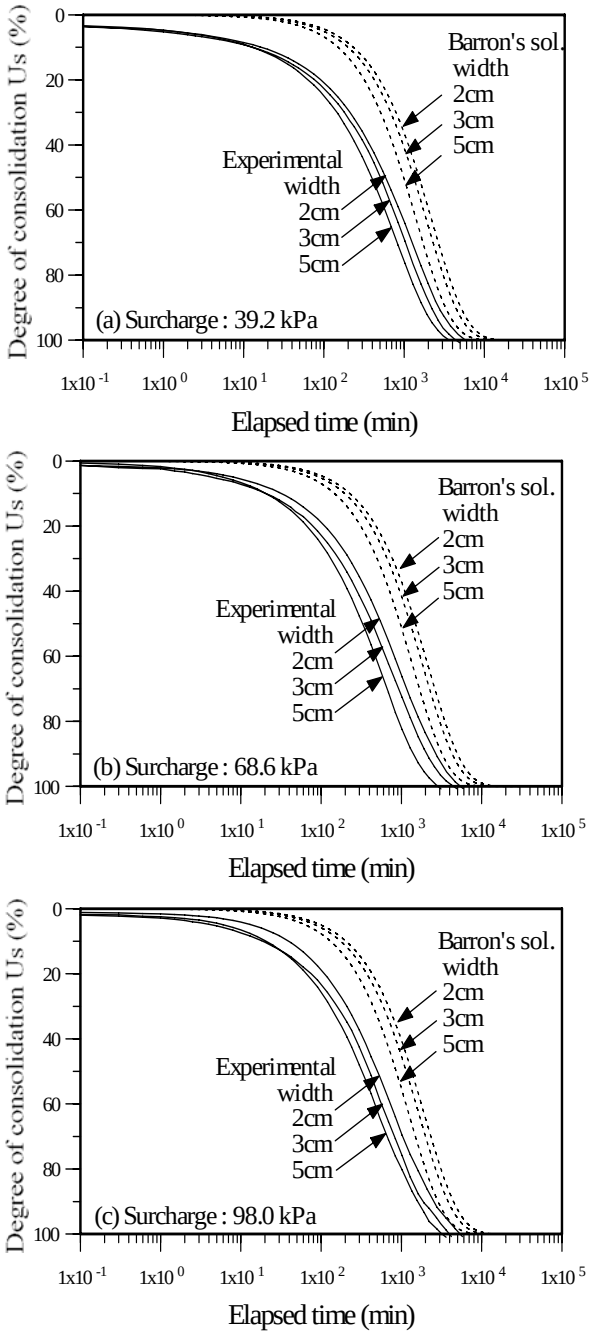

그림 6. 모형지반의 평균적 압밀도의 경시변화

그림 7은 모형실험결과로부터 얻은 압밀종료시간과 PBD폭의 관계를 나타내고 있다. PBD폭이 넓을수록 모형지반의 압밀종료는 빠르게 나타나고 있다. 한편, 동일한 PBD폭에 대해서 재하압력이 클수록 즉, 모형지반에 대한 재하단계가 높아질수록 압밀종료시간은 빠르게 나타남을 알 수 있다. 따라서, 모형실험에서는 각각의 재하단계가 진행됨에 따라서 모형지반의 압밀계수가 변화되었다고 판단된다.

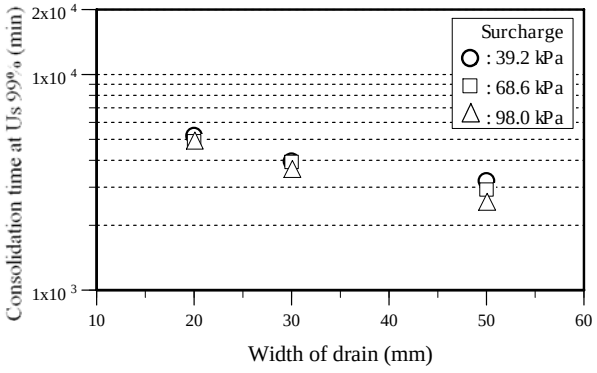

그림 7. 압밀종료시간과 PBD폭의 관계

5. 결 론

본 연구에서는, PBD가 설치된 연약점토지반의 압밀거동을 고찰하기 위해 일련의 실내 모형실험을 실시하였으며 실험결과로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 모형실험에서 PBD의 폭에 관계없이 재하단계가 낮을수록 침하량은 크고 압밀시간은 길게 나타났다. 또한, 재하압력의 크기가 동일한 경우에는 PBD의 폭에 관계없이 거의 동일한 침하량이 관측되었다.

(2) 모형지반 중 PBD에 근접한 위치에서의 과잉간극수압은 압밀중 그 발생량이 재하압력보다 작게 나타났으며 경과시간 약 1000분까지는 그 소산도 비교적 빠르게 나타났지만, 그 외의 부분에서는 모두 재하압력과 거의 동일한 값의 최대값을 보였고 각각의 소산거동 또한 큰 차이없이 일치하였다. 그러나, 약 1000분 이후의 모든 과잉간극수압의 소산거동은 위치에 관계없이 대부분 일치하였다.

(3) 초기함수비가 142%인 모형지반에 대해서 1차압밀 종료 후 함수비 분포를 측정한 결과, 모형지반의 함수비는 63%~69%의 범위에서 PBD로부터 멀어질수록 그 값이 증가함을 알 수 있었다. 따라서, 모형지반의 간극비는 PBD에서 가까울수록 작으며, 모형지반전체는 불균질한 간극상태에 있음을 알 수 있었다.

(4) 모형실험과 동일한 재하압력과 PBD폭에 대한 압밀거동을 Barron의 이론해를 이용하여 재현한 결과, 모형실험에서의 모형지반 상면의 배수조건이 전체의 평균적 압밀거동에 영향을 미쳤다는 사실을 알 수 있었다.

(5) 동일한 PBD폭에 대해서, 모형지반에 대한 재하단계가 높아질수록 압밀종료시간은 빠르게 나타났다. 따라서, 모형실험에서는 각각의 재하단계가 진행됨에 따라서 모형지반의 압밀계수가 변화되었다고 판단된다.

본 연구는 모형지반 상면이 배수조건인 경우에 대한 실험결과를 토대로 수행되었으므로 PBD에 의한 연약지반의 압밀거동을 보다 정량적으로 고찰하기 위해서는 보다 실제현장조건에 근사한 상면 비배수조건의 경우에 대한 연구가 추가로 수행되어야 한다고 판단된다. 따라서, 필자는 그러한 조건에서의 모형지반에 대한 수치해석적 연구를 계획하고 있다.

(접수일자 : 2003년 8월 5일)

참 고 문 헌

1. 柳 承庚 (2002), プラスチックボードドレーンによる壓密促進効果の評價手法に關する硏究. 博士學位論文, 大阪大學, pp. 59-94.
2. Barron, R.A. (1948), Consolidation of fine-grained soils by drain wells. Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol. 113, pp. 718-742.
3. Hansbo, S. (1981), Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains. Paper 12/22, Proceedings of the 10th ICSMFE, Stockholm, Sweden, Vol. 3, pp. 677-682.
4. Oda, K. , Matsui, T. and You, S. K. (2001), Model tests and numerical simulations on consolidation behavior of clay ground improved by SCP with low replacement area ratio. International Symposium on Recent Developments of Ground Improvement (ISRDGI 2001), Special Technical Publication-2, pp. 9-12.
5. Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P. and Leroueil, S. (1983), The permeability of natural soft clays. Part II : Permeability characteristics. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, pp. 645-660.