

연약점성토 지반에 타설된 십자형배수재의 등가직경 산정

Estimation of Equivalent Diameter for Cross Shaped Vertical Drain Installed in Weak Clay Soils

장 연 수*¹ Jang, Yeon-Soo
김 영 우*² Kim, Young-Woo
김 수 삼*³ Kim, Soo-Sam

Abstract

In this paper, the consolidation efficiency and the equivalent diameter of the cross shaped drain are examined by using the laboratory test and the numerical model, and the results are compared with those of the band shaped drain. The equivalent diameter of the tested drains is back-calculated from the laboratory experiment and compared with those calculated from the formula suggested in the literature. The efficiency of the cross shaped drain is evaluated by using the 3-D flow program which was validated by the settlement-time test fill data.

The results of laboratory test show that the equivalent diameter of the band shaped drain was close to the Rixner's formula and that of the cross shaped drain was fit to the following formula: $d_w = \frac{3}{4} \cdot (b+t)$. The results of the numerical analysis show that the cross shaped drain can reduce the consolidation time by 9-10% from that for the band shaped drain. The equivalent diameter obtained from the numerical flow model by using the field data is 3.5 times smaller than that obtained from the laboratory consolidation test.

요 지

본 논문은 실내시험과 수치모델을 이용하여 십자형 배수재의 압밀축진효과와 등가직경을 검토하고 판형배수재와 비교하였다. 배수재의 등가직경은 실내시험으로부터 역계산하여 문헌에 의해 제시된 공식으로부터 산정된 결과와 비교하였고, 압밀효과는 3차원 흐름해석프로그램인 MODFLOW를 사용하였다. 해석모델의 신뢰성은 현장의 침하시간 예측 자료를 이용하여 검토하였다. 실내시험결과 산정된 판형 배수재의 등가직경은 Rixner의 제안식에 유사한 경향을 보였고, 십자형 배수재의 등가직경은 $d_w = \frac{3}{4} \cdot (b+t)$ 로 산정되었다. 실제현장을 모델링한 수치해석결과 십자형배수재는 압밀시간이 9-10% 감소하였고, 현장자료를 이용한 수치 흐름모델로부터 산정한 등가직경은 실내시험보다 3.5배 작은 것으로 나타났다.

Keywords : Plastic board drain, Cross shaped drain, Equivalent diameter, Consolidation efficiency, Numerical model

*1 정회원, 동국대학교 공과대학 토목환경공학과 부교수

*2 동국대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정

*3 정회원, 중앙대학교 공과대학 토목공학과 교수

1. 서론

연약지반개량공법으로 많이 적용되는 연직배수(vertical drain)공법으로는 종래에 주종을 이루던 샌드드레인공법의 대응으로 경제성, 시공성 및 품질관리 측면에서 유리한 플라스틱 보드 드레인(plastic-board drain, PBD)재를 이용하는 사례가 증가하고 있고, 그 종류도 다양하게 생산되고 있다.

PBD공법이 가지고 있는 문제점으로 현장지반내로 타입시 발생하는 smear zone 과 성토하중증가로 횡압이 증가하면서 나타나는 배수 단면의 감소로 인한 well resistance의 영향을 들 수 있는데, 이러한 원인에 의해 설계시의 침하-시간 예측치와 실측치 간에 차이가 발생하게 된다. 이와 같은 영향을 최소화하기 위하여 각종 실내시험이나 현장시험을 실시하여 배수재 타설 방법 또는 장비 등에 대한 개량이 지속적으로 이루어지고 있다. Pradhan 등(1996)과 Kim 등(1997)이 제안한 십자형 배수재는 기존 멘드럴 직경은 증가하지 않고, 배수재의 단면적을 증가시켜 통수능을 증대시킴으로써 well resistance의 영향을 줄일 수 있어 배수재의 타설간격을 줄이거나 대심도의 지반개량에도 적용가능할 수 있을 것으로 보여진다.

본 논문은 실제 지반내에 배수재를 타설하였을 경우를 모사한 원통형 압밀시험을 행하여 십자형 배수재의 성능을 판형과 비교 분석하였고, 십자형 배수재의 등가직경을 산정하였다. 판형배수재가 시공된 현장지역을 토대로 수치해석 프로그램을 이용하여 모델링하고 판형배수재를 개량한 십자형배수재로 시공하였을 경우의 압밀축진효과를 예측하였고, 실내시험과 현장에서의 등가직경의 차이를 검토하였다.

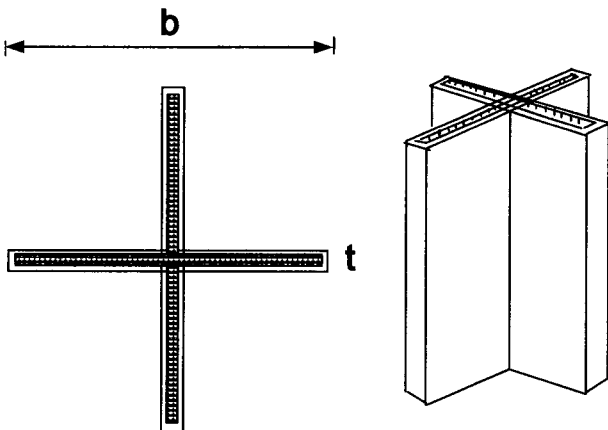


그림 1. 십자형 배수재의 형상

2. 원통형셀 압밀시험

원통형셀 압밀시험(cylindrical cell consolidation test)은 배수재의 성능을 평가하기 위하여 실제 지반에 연직배수재를 타설하였을 경우를 모형화한 시험이며, 원통형셀 시료 중앙부에 설치된 배수재에 의하여 방사형 배수가 이루어짐으로써 발생하는 시료의 압밀침하특성 및 압밀속도를 측정하는 시험이다. 시험에 사용된 십자형 배수재의 형상은 그림 1에 나타낸 바와 같이 판형의 MD88배수재 크기에 맞게 자르고 붙여서 십자형상으로 만들었다. 코어 부분과 필터부분과의 조합으로 구성되는 십자형 배수재의 두께는 4mm이고, 폭은 5cm(단면적 3.84cm²), 10cm(단면적 7.84cm²) 2가지로 구분하였다.

시험장치는 그림 2에 나타나 있는 바와 같이 내경 23.5cm, 높이 50cm의 원통형 아크릴셀로 이루어져 있으며, 원통형셀내에 점토시료를 포설한 후 시료의 중앙부에 배수재를 설치하고 시료 상부면의 재하판에 수압에 의한 압력을 가함으로써 실제 지반내 배수재의 배수효과에 의한 압밀이 발생되도록 제작되었다. 시료와 접촉되는 상부면과 하부면은 불투수면이 되도록 하여 시료내부의 응력발생에 의한 간극수의 흐름은 가장 짧은 유로를 따라 발생됨으로서 수평방향으로만 배수가 이루어지고, 중앙부의 배수재로 집중되어 실제 현장에서의 조건과 동일하게 상부방향으로 배수되도록 하였다. 시험에 사용한 십자형배수재는 폭 5cm(단면적 3.84cm²)로 폭 10cm의 판형배수재(단면적 4cm²)와 단면적을 비슷하게 하여 형상에 의한 압밀효과를 비교하고자 하였다. 점토시료는 액성한계 45.6%, 소성한계

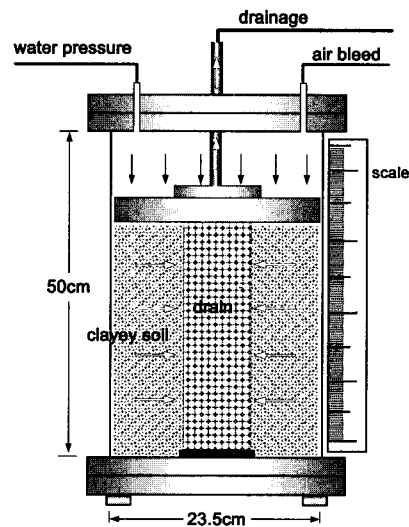


그림 2. 원통형셀 압밀시험장치

표 1. 시험에 사용된 흙 시료의 특성

classification	properties
soil classification	CL
percent passing No. 200 sieve	92%
dry unit weight(γ_d)	1.25t/m ³
specific gravity(G_s)	2.64
liquid limit(LL)	45.6%
plastic limit(PL)	20.1%
plastic index(PI)	25.5

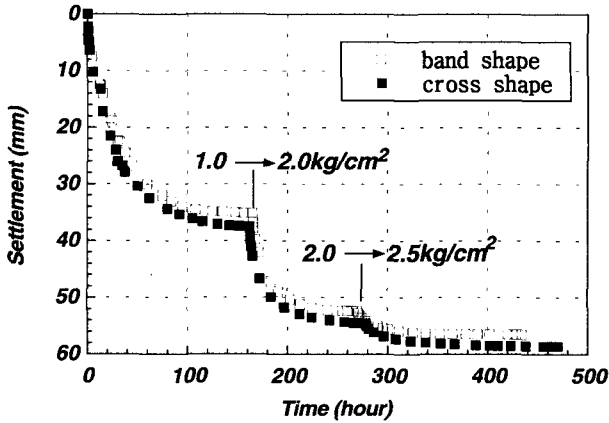


그림 3. 시간에 따른 압밀침하량 (1.0, 2.0, 2.5kg/cm²)

20.1%, 소성지수 25.5, 비중 2.64의 해성점토로 고풍수비상 태의 균질한 점성토를 준비하고, 미리 배수재를 직립으로 시험셀내에 설치한 후 시료를 셀내에 포설하여 예압밀과정을 거친후 시험을 실시하였고, 하중재하시 수압에 의한 물의 침투를 방지하기 위하여 원통셀과 접합하는 재하판 둘레에 O-ring을 설치하였다. (표 1참조).

그림 3은 재하와 동시에 소정의 시간간격으로 연직침하량을 측정하여 판형과 십자형배수재의 시간에 따른 압밀 침하관계 곡선을 나타낸 것이다. 십자형과 판형의 최종 침하량은 각각 58.4mm와 57.5mm로 침하량이 비슷하게 나타났다.

3. 연직배수재 등가직경

3.1 문헌조사

연약지반 개량을 위한 수직배수 공법중 band drain의 압밀이론은 근본적으로 샌드드레인의 압밀이론과 동일하다. 샌드드레인의 기본 개념은 과잉 간극수압이 연직방향은 물론, 방사성방향으로 소산되도록 하여 압밀을 촉진시키는 것으로 Barron(1948)은 Terzaghi의 1차원 압밀방정

식에 기초를 두고 smear zone 과 well resistance의 영향을 고려하지 않은 이상적인 조건하에서 수평방향에 대한 평균 압밀도를 다음과 같이 제안하였다.

$$\bar{U}_h = 1 - e^{-8T_h/F(n)} \quad (1)$$

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

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

여기서, \bar{U}_h : 수평방향에 대한 평균 압밀도

(average degree of horizontal consolidation)

T_h : 수평방향의 시간계수

(horizontal time factor)

n : 타설간격비(spacing ratio)

d_e : 배수재 영향원의 등가직경

(diameter of the equivalent soil cylinder)

d_w : 배수재의 등가직경

(equivalent diameter of the drain)

배수재의 설계에 있어서 등가직경 d_w 는 가장 중요한 변수중의 하나이다. 지금까지 많은 연구자들이 등가직경 d_w 의 산정에 관한 연구를 시도하였는데(표 2), Hansbo(1979)는 밴드형의 인공배수재의 주변 둘레길이와 원형의 둘레가 같다는 기하학적 원리를 이용하여 밴드형 배수재의 주변 둘레길이가 같은 둘레를 갖는 원형의 단면과 동일한 압밀효과를 나타낸다고 제안하였으며, 배수재의 폭을 b , 두께를 t 라 하였을 때 d_w 는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$d_w = \frac{2(b+t)}{\pi} \quad (3)$$

그러나, 밴드형 배수재로의 물의 흐름은 원주형 배수재에 비하여 유리하지 못하므로(Jansen 와 Hoedt, 1983), Rixner(1986)는 실질적인 등가직경의 산정은 식 3으로부터 얻어진 d_w 값에 계수 $\pi/4$ 를 곱해주어야 한다고 하였다.

$$d_w = \frac{b+t}{2} \quad (4)$$

Kamon(1991)은 모형실험과 현장시험의 결과를 통하여 밴드형 배수재의 단면적은 동일한 단면적을 가진 배수

표 2. 문헌에 나타난 PBD의 등가직경 산정식

source	equivalent diameter
Hansbo(1979)	$d_w = \frac{2(b+t)}{\pi}$
Rixner(1986)	$d_w = \frac{b+t}{2}$
Kamon(1991)	$d_w = \sqrt{\frac{4bt}{\pi}}$

* b is width and t is thickness of PBDs

재와 같은 효과를 나타낸다는 가정을 통하여 등가직경 산정법을 제안하였다.

3.2 십자형배수재의 등가직경

십자형배수재의 등가직경은 기존의 Hansbo와 Kamon에 의해 제안된 판형배수재의 등가직경산정 방법과 동일하게 다음과 같이 산정할 수 있다.

배수재의 둘레길이를 고려한 경우(Hansbo, 1979)

$$d_w = \frac{4 \times b}{\pi} \quad (5)$$

배수재의 단면적을 고려한 경우(Kamon, 1991)

$$d_w = 2 \times \sqrt{\frac{t(2b-t)}{\pi}} \quad (6)$$

그림 4와 그림 5는 원통형셀 압밀시험 결과로부터 산정한 판형 및 십자형(b=5cm) 배수재의 등가직경과 Hansbo(1979), Kamon(1991) 및 Rixner(1986)가 제시한 등가직경(d_w) 및 압밀도-시간계수의 관계를 비교한 것이다. 그림 5

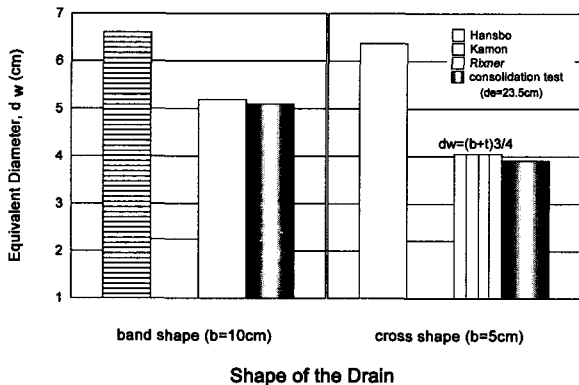
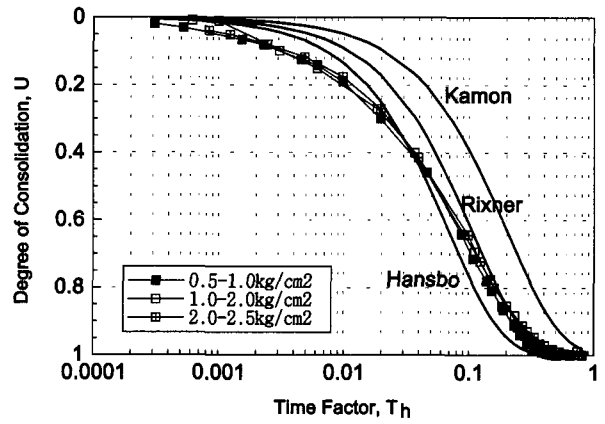
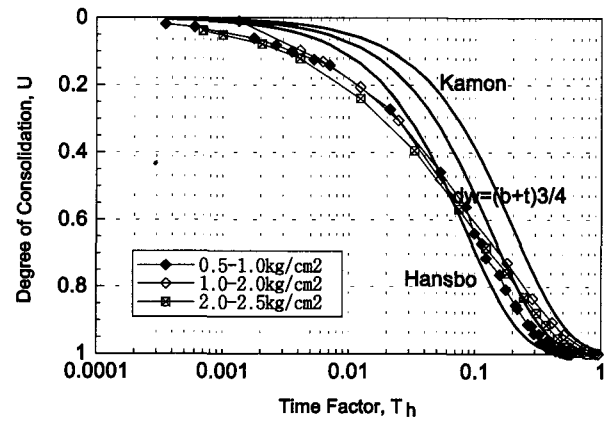


그림 4. 실내시험을 통하여 산정한 등가직경과 Hansbo, Rixner, Kamon의 이론식에 의한 등가직경의 비교

로부터 초기 압밀도 40%내에서 압밀시험으로 인한 시간계수는 Hansbo와 Kamon의 등가직경으로 계산한 시간계수보다 작게 나타났고, 판형배수재의 경우는 압밀도 80%



(a) 판형



(b) 십자형(폭=5cm)

그림 5. 실내시험을 통한 판형 및 십자형 배수재의 압밀도-시간계수의 관계

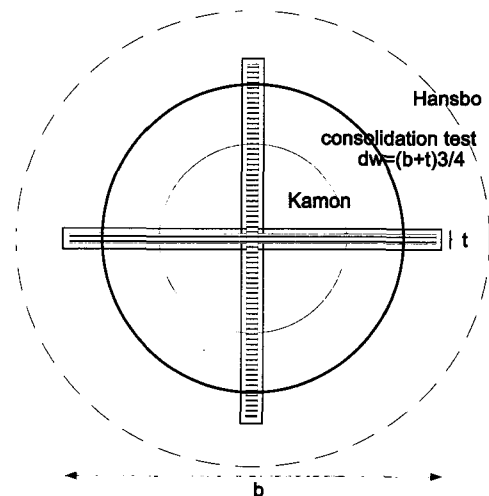


그림 6. 실내시험을 통하여 산정한 십자형배수재의 등가직경과 Hansbo와 Kamon의 이론식에 의한 등가직경의 비교

이상에서 Rixner(1986)가 제안한 방법과 일치하였다.

실내시험을 통하여 십자형배수재의 등가직경을 산정한 결과 Hansbo(1979)의 배수재 둘레를 고려한 제안방법은 과대 평가되고, Kamon(1991)의 배수재 단면적을 고려한 제안방법은 과소평가되는 것으로 나타났다. 단면적이 2배인 십자형배수재의 경우 등가직경은 판형배수재 등가직경의 2배(식 4참조)에 십자형 중앙부의 수두손실을 고려하기 위해서 시험결과를 토대로 시행오차에 의해 압밀도-시간계수의 관계를 plot한 결과 실내시험의 곡선과 가장 유사한 계수 3/4을 곱하여 다음과 같이 산정되었다.

$$d_w = \frac{3}{4} \cdot (b + t) \quad (7)$$

4. 수치해석을 이용한 십자형 배수재의 현장 적용

판형배수재가 시공된 현장지역을 토대로 수치해석 프로그램을 이용하여 모델링하고, 판형배수재를 개량한 십자형배수재(b=10cm)로 시공하였을 경우 압밀효과를 검토하였다.

4.1 입력변수와 모델 검증

해석을 위한 지역은 연약지반 처리공법의 결정을 위한 양산의 시험시공현장(1997, 한국토지공사)으로 Paper drain 공법을 선정한 18,000m²의 부지중 MD88(배수재 간격 1m)배수재를 타설한 2,250m²구역이다.

지반조사결과 시험시공부지 하부 30m 부근에는 약 5t/m³의 피압수가 존재하고 지표면은 약 3m두께의 모래 또는 실트층이 있고 그 아래 약 25m두께의 실트질 점토층이 분포하는데, 실트와 점토 또는 얇은 두께의 모래층으로 번갈아 퇴적되어 있어 균질하지 않다. 실내시험 결과 본 지역의 No.200체 통과량은 거의 90%이상으로 세립분의 함유량이 매우 높은 점토로 구성되어 있다. 압밀계수(coefficient of consolidation, CV)는 $2.2 \times 10^{-4} \sim 2.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 의 범위로 분포되어 있으며 지표면에서 크게 나타나고 점차적으로 일정하다가 GL - 20.0m부터 증가하고 있다(그림 7).

본 해석을 위하여 사용된 수치해석 모델은 3차원 유한 차분해석법(FDM : finite difference method)을 이용한 MODFLOW(A Modular Three - Dimensional Ground - Water Flow Model) 컴퓨터 프로그램(McDonald and

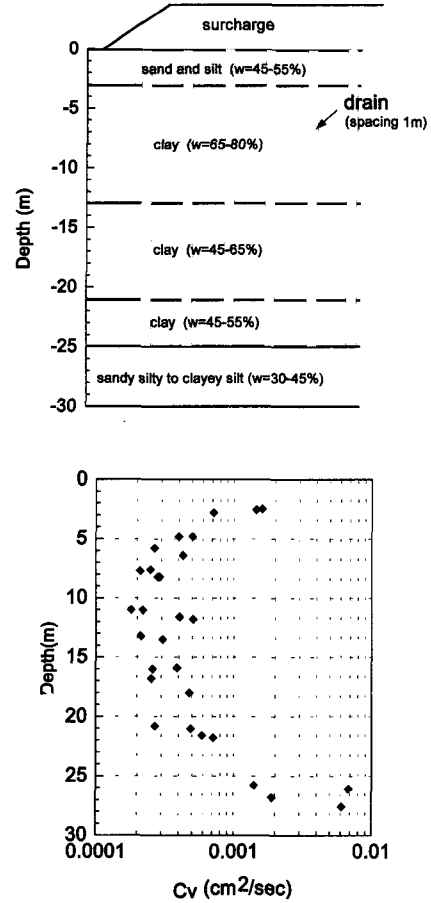


그림 7. 현장의 지층 단면도와 깊이에 따른 압밀계수

Harbaugh, 1988)으로 흐름 해석을 위해서 필요한 대수층 정수는 투수량계수(transmissivity)와 저류계수(storage coefficient ; storage coefficient)가 있다. 투수량계수는 투수계수(k)에 대수층의 포화두께(b)를 곱한 값과 동일하고, ($T = k \cdot b$, m²/sec) 저류계수는 평면 2차원 지하수를 고려할 때 단위 수평 단면적을 갖는 연직 흩기둥에서 단위 지하수위의 변화가 생길 때 발생하는 저류수 변화량의 절대치를 말하며, 대수층의 상태에 따라 피압지하수와 자유수면지하수로 구분한다. 피압지하수의 경우 대수층 상부의 가압층에서 물의 출입이 없는 것으로 하면, 수압증감에 따른 대수층의 신축 및 흡입자와 물의 팽창·수축에 의해 초래되는 저류계수는 다음 식과 같다.

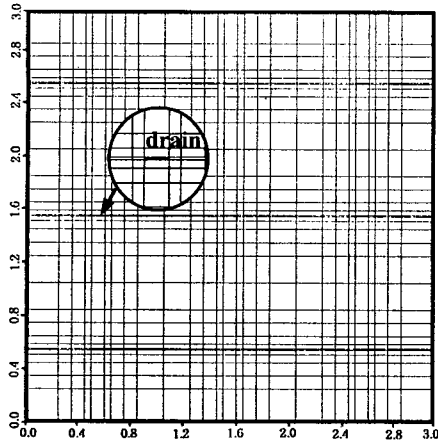
$$S = S_s \cdot b = \gamma_w (a + n\beta) \cdot b \quad (8)$$

여기서,

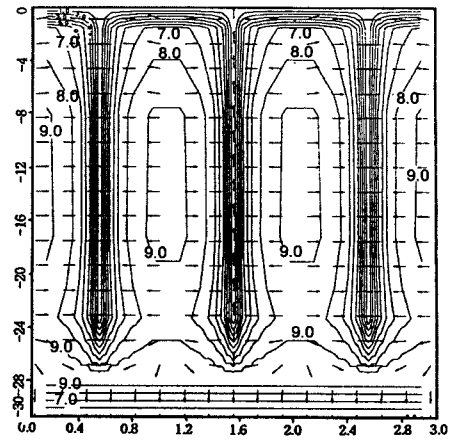
S_s : 비저류계수(specific storage coefficient)

γ_w : 물의 단위중량 ($= 9.8 \times 10^3 \text{ N/m}^3$)

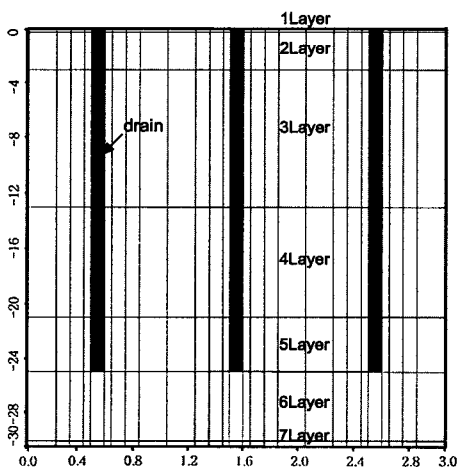
a : 대수층의 압축계수



(a) 수평 격자 (unit : m)

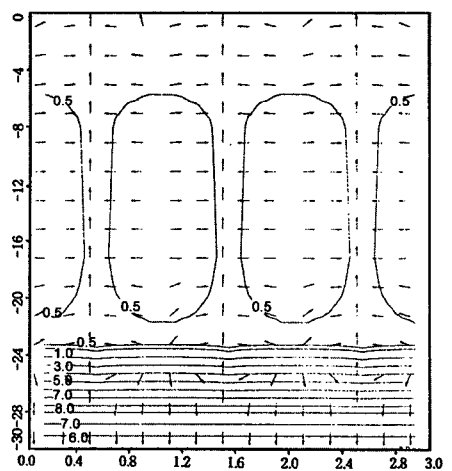


(a) 30일 후



(b) 수직 격자 (unit : m)

그림 8. 해석을 위한 수평 및 수직 격자망



(b) 700일 후

그림 9. 수직방향단면의 수두포텐셜과 흐름방향

- β : 물의 압축계수
- b : 대수층의 두께
- n : 간극률

표 3과 그림 8은 수치해석프로그램인 MODFLOW의 입력자료와 격자망을 나타낸 것이다. 현장지반의 토질정수는 한국토지공사(1997)의 현장 지반자료를 토대로 하였고, 배수체에 있어서는 실내시험을 통해서 수평방향 투

수계수는 필터의 투수계수를 연직방향 투수계수는 심도 증가와 성토에 따라 배수체에 가해지는 횡압을 고려하여 횡압 3.0kg/cm^2 에서의 투수능으로부터의 연직투수계수를 입력하였다. 경계조건은 대기와 접하는 최상부층은 0m의 일정수두로 하였고, 최하부 7층은 5t/m^3 의 피압수 영향을 고려하여 5m의 일정수두를 두었다. 그 외의 점토층(2~6층)은 5m성토($r_t = 2.0\text{t/m}^3$)에 의한 과잉간극수압 10m를 초기조건으로 하여 시간경과에 따라 상부와 하부

표 3. 해석을 위한 입력자료와 경계조건

Layer	$C_h(\text{cm}^2/\text{s})$	$S_s(1/\text{m})$	$k(\text{cm}/\text{s})$	boundary condition
1 Layer(0-0.1m)				constant head = 0m
2 Layer(0.1-3m)	6×10^{-3}	0.02	1.2×10^{-6}	initial head =10m
3 Layer(3-13m)	2.3×10^{-4}	0.015	3.4×10^{-8}	(excess pore water pressure)
4 Layer(13-21m)	"	"	"	"
5 Layer(21-25m)	"	"	"	"
6 Layer(25-29.5m)	6×10^{-3}	0.02	1.2×10^{-6}	"
7 Layer(29.5-30m)				constant head = 5m (artesian pressure)

* drain: $k_x=k_y=0.004$, $k_z=5$ (cm/s)

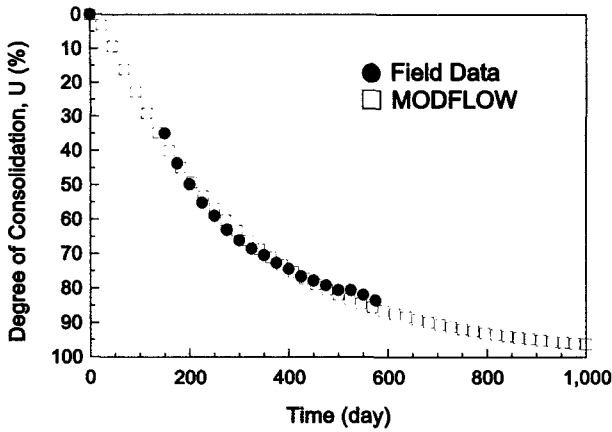


그림 10. 현장실측자료와 수치해석프로그램을 통한 시간에 따른 압밀도 변화 비교

층으로 흐름이 발생되도록 모사하였다. 수평 격자의 경우 배수재의 두께가 4mm임을 감안하여 배수재를 중심으로 세밀하게 격자를 나누어 1m간격으로 배수재가 위치하도록 하였고, 수직 격자의 경우 25m깊이까지 배수재가 타설되게 하였다.

그림 9는 배수재 주변의 수두포텐셜과 흐름벡터의 연직단면이다. 5m(단위중량 $2t/m^3$)의 성토에 따라 지반내에는 약 10m의 과잉간극수압이 발생하며 시간이 지남에 따라 배수재를 중심으로 소산되어 가는데, 본 해석결과 배수재 중심을 기준으로 방사상 흐름을 형성하여 상부로 배출되고, 배수재가 타설되지 않은 무처리층은 하부로 향하는 연직흐름을 형성하여, 양면배수가 이루어짐을 알 수 있다. 초기시간(30일 후)에 9.0m인 과잉간극수압이 시간이 지남에 따라 영향반경이 조금씩 커져 700일이 지난후에는 90%이상이 소산되는 것으로 나타났다.

그림 10은 MODFLOW프로그램의 과잉간극수압 소산 시간으로부터의 압밀도와 현장 침하량으로부터의 시간에 따른 압밀도를 비교한 그래프이다. 그림 10으로부터 수치해석프로그램은 현장을 매우 유사하게 모사하고 있음을 알 수 있다.

4.2 십자형배수재의 적용

그림 11은 MODFLOW 프로그램 해석에 의한 판형과 십자형 배수재의 압밀도-시간곡선이다. 그림 11로부터 십자형배수재를 타설하였을 경우 소정의 압밀도(80% 및 90%)에 도달되는 시간이 9~10% 단축되었다. 따라서 기존의 배수재를 십자형으로 개량하여 사용할 경우 대상현장의 소요 예정된 지반개량기간을 10%정도 단축 가능할

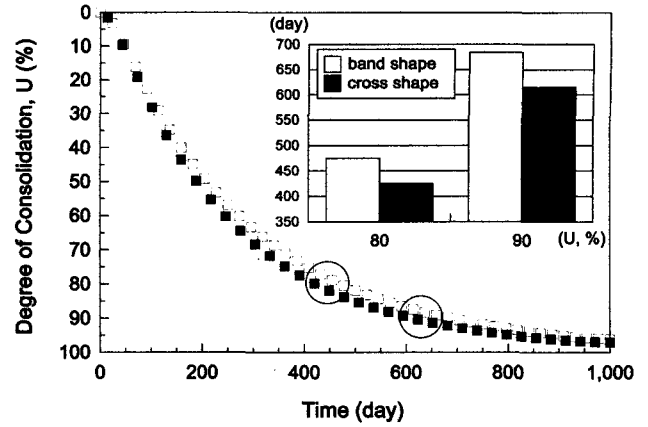


그림 11. MODFLOW 프로그램에 의한 판형과 십자형 배수재의 압밀도-시간곡선

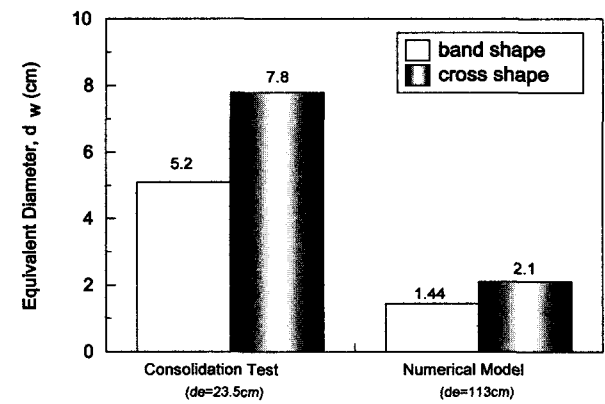


그림 12. 실제현장에 대한 수치해석 결과와 실내시험으로부터 역계산한 배수재 등가직경의 비교

것으로 판단된다.

그림 12는 실내시험 및 수치해석으로부터 역계산한 배수재의 등가직경으로 실제현장에 대한 수치해석결과로부터 역계산한 배수재의 등가직경은 실내시험으로부터 구한 등가직경보다 약 3.5배정도 작은 것으로 나타났다. 이는 현장에서 크게 나타나는 smear 및 well resistance의 영향이 실내압밀시험의 결과에 비교하여 현장 배수재의 등가직경 감소로 나타나는 것으로 사료된다.

5. 결론

판형 PBD재(MD88)의 형태를 십자형(cross shape)으로 변형하여 실내시험을 행하고, 수치해석프로그램을 사용하여 그 압밀배수효과와 등가직경을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 원통형 압밀시험결과 산정된 판형 배수재의 등가직경

은 Rixner의 제안식에 유사한 경향을 보였고, 십자형 배수재의 등가직경은 $d_w = \frac{3}{4} \cdot (b+t)$ 로 산정되었다.

- 2) 현장지반에 관형배수재를 개량한 십자형배수재로 시공하였을 경우를 MODFLOW 프로그램을 사용하여 해석한 결과 소정의 압밀도(80% 및 90%)에 도달되는 시간이 9~10% 단축되었다. 따라서 기존의 배수재를 십자형으로 개량하여 사용할 경우 대상 현장의 소요 예정된 지반개량기간을 10%정도 단축 가능할 것으로 판단된다.
- 3) 현장자료를 이용한 수치해석으로부터의 등가직경과 실내시험으로부터의 등가직경을 비교한 결과 전자에 의한 등가직경이 후자와 비교하여 약3.5배 작은 것으로 나타났고, 이러한 실내시험으로부터 산정한 등가직경이 실제 현장 배수재의 등가직경보다 작은 이유는 현장에서 smear 및 well resistance의 영향이 커서 등가직경이 작게 평가되는 것으로 사료된다.
- 4) 수치해석이 적용된 현장의 경우 배수재의 타설 깊이가 25m 내외이었으며 10^{-8} cm/sec의 저투수점토가 많은 비율을 차지하고 있는 현장으로 배수재의 타설 깊이가 증가하고 현장토의 투수성이 증가하는 경우에 십자형배수재의 효용성은 더 증가할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 삼성중공업(주) 건설기술연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 한국토지공사(1997), 양산 물금 시험시공 연구공사 중간보고서.
2. Barron, R.A.(1948), "Consolidation of Fine Grained Soils by Drain Wells", ASCE, Transaction, Paper No. 2346, pp.718-754.
3. Hansbo, S.(1979), Consolidation of Clay by Band-shaped Prefabricated Drains, Ground Engineering, Vol. 12, No. 5, pp. 16-25.
4. Kamon, M., Pradhan, T.B.S. and Sua, S.(1991), "Evaluation of Design Factors of Prefabricated Band-shaped Drains", GEO-COAST '91, pp. 329-333.
5. Kim, S.S., Jang, Y.S., Kang, M.S. and Koh, K.W.(1997), "Shape Effect of Mandrels on Smear and Well Resistance of Plastic Drain Boards", Proceedings of 7th International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, May 25-30.
6. McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W.(1988), "A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model", U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations, Book 6, Chapter A1.
7. Pradhan, T.B.S., 岡本正廣(1996), "十字形鉛直ドレーンによる壓密促進効果とその等価径の評価法", 日本土木學會論文集, No. 554/III-37, pp. 221-230.
8. Rixner, J.J., Kraemer, S.R. and Smith, A.D.(1986), "Prefabricated vertical drains, Vol. 1.", Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-86/168, Washington D.C.

(접수일자 1999. 7. 19)