

## 십자형 연직배수재의 점성토지반 개량에의 적용성 Applicability of Cross Shaped Drain to Soft Clay Improvement

장연수<sup>1)</sup>, Yeon-Soo Jang, 김영우<sup>2)</sup>, Young-Woo Kim, 김수삼<sup>3)</sup>, Soo-Sam Kim

<sup>1)</sup> 동국대학교 토목환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Dongguk University.

<sup>2)</sup> 대우엔지니어링 터널부, Civil Engineer, Civil & Infrastructures Div. Daewoo Co.

<sup>3)</sup> 중앙대학교 건설대학원 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Chung-Ang University.

**SYNOPSIS** : Applicability of the cross shaped drain in a soft clay ground is examined using the laboratory discharge capacity test, column consolidation test and 3-D numerical flow analysis. 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 effective range of the cross shaped drain about the discharge capacity and coefficient of permeability is analyzed. The results of numerical analysis show that the cross shaped drain which has a cross-sectional area twice of the band shaped drain can reduce the consolidation time by 30% from that for the band shaped drain in a soft clay ground that  $K$  is over  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec

**KEYWORDS** : cross shaped drain, the equivalent diameter, the discharge capacity, consolidation efficiency

### 1. 서론

연약지반개량공법으로 많이 적용되는 연직배수(Veertical Drain)공법으로는 종래에 주종을 이루던 샌드 드레인공법의 대응으로 경제성, 시공성 및 품질관리 측면에서 유리한 플라스틱 보드 드레인 (Plastic-board Drain, PBD)재의 이용이 증가되고 있고, 그 종류도 다양하게 생산되고 있다.

PBD공법이 가지고 있는 문제점으로 현장지반내로 타입시 발생하는 smear zone 과 배수재 필터와 코어의 clogging 또는 성토하중증가로 횡압이 증가하면서 배수 단면의 감소로 인한 well resistance의 영향을 들 수 있는데, 이러한 원인에 의해 설계시의 예측치와 실측치간에 차이가 발생하게 된다. 따라서 이와 같은 영향을 최소화 하기 위하여 각종 실내시험이나 현장시험을 실시하여 드레인 타설 방법 또는 장비등에 대한 개량이 지속적으로 이루어지고 있다.

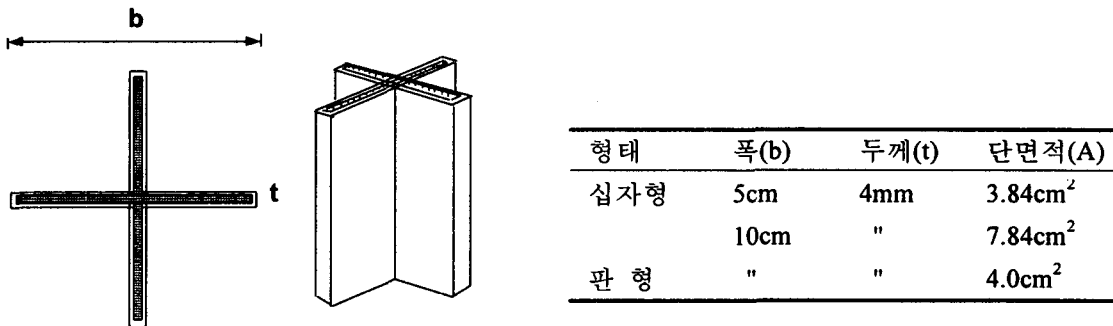
Pradhan(1996)은 판형 PBD 4개를 조합한 십자형배수재를 만들어 그 적용성 및 설계방법에 관한 연구를 진행하였는데 기존의 판형배수재를 십자형으로 개량하여 사용할 경우 배수 단면적 확대에 의한 통수능이 증가하여 대심도의 지반개량에도 적용이 가능하고, 배수재 타설간격의 변화 없이 지반의 조기 개량효과를 가져올 것으로 판단되는 바 본 논문에서는 실내시험 및 실제 현장에 대한 수치해석 모델을 이

용하여 십자형배수재의 압밀촉진효과와 그 적용성을 제시하고자 하였다.

## 2. 실내 통수능 및 압밀시험

지반내의 높은 측압이 작용하는 상태에서 또는 격임이나 뒹이 발생하는 악조건하에서도 십자형 배수재가 정상적인 기능을 발휘할 수 있는지를 판별하기 위해 통수능 시험과 원통형셀 압밀시험을 실시하였다.

시험에 사용된 십자형배수재는 기존 판형의 MD88배수재를 크기에 맞게 자르고 붙여서 십자형상으로 만들었다(<그림1>). 코어부분과 필터부분과의 조합으로 구성되는 십자형배수재의 폭은 5cm, 10cm 2가지로 구분했고, 비교를 위해 MD88배수재가 사용되었다.

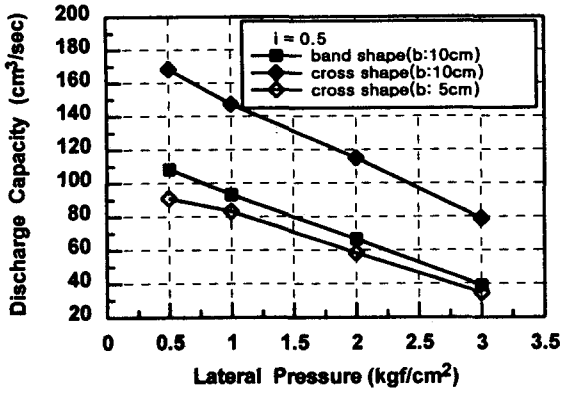


<그림 1> 시험에 사용된 십자형배수재의 형상

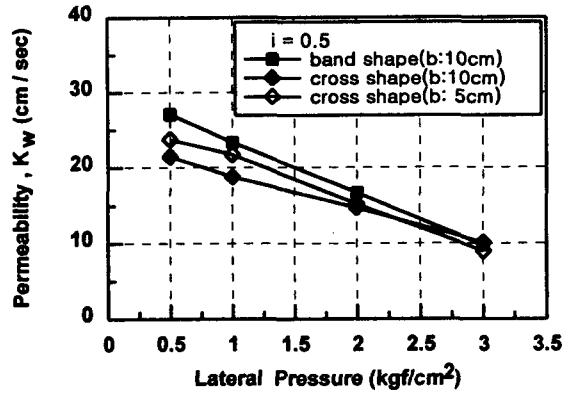
시험장치는 직경 20cm, 높이 50cm인 원통형 아크릴관내에 배수재를 두께 0.3mm의 고무멤브레인 속에 집어넣어 상, 하부 배수관로에 연결하여 밀봉한 후 수압에 의한 측압을 적용시켰다.

<그림 2>은 동수경사 0.5에서의 폭 10cm의 판형배수재와 폭 5cm, 10cm의 십자형배수재에 대해서 측압에 따른 통수능의 변화를 나타낸 것이다. 측압의 증가에 따라 필터가 코어 속으로 밀려들어가 배수단면을 감소시키므로 통수능이 감소하는 경향을 나타냈다. 폭 5cm의 십자형과 폭 10cm의 판형배수재에서의 통수능이 10cm<sup>3</sup>/sec 정도의 차이를 두고 비슷하였고, 폭 10cm의 십자형배수재가 폭 5cm의 십자형배수재보다 2배정도 크게 나타났다. <그림 3>은 통수능력을 배수재의 단면적으로 나누어 측압의 증가에 따른 종방향투수계수를 나타낸 것이다. 측압의 증가에 따라 투수계수는 감소하고 3가지 형태의 배수재가 거의 유사한 양상을 보임을 알 수 있다.

원통형셀 압밀시험은 배수재의 성능을 평가하기 위하여 실제 현장에 배수재를 타설하였을 경우를 모형화한 시험으로서 시험장치는 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.



<그림 2> 측압에 따른 판형과 십자형 배수재의 통수능 변화 (i=0.5)



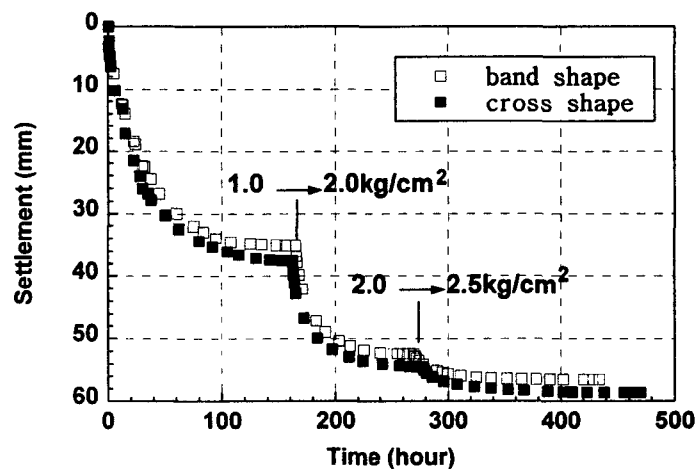
<그림 3> 측압에 따른 투수계수의 변화

시험에 사용한 십자형배수재는 폭 5cm(단면적 3.84cm<sup>2</sup>)로 폭 10cm의 판형배수재(단면적 4cm<sup>2</sup>)와 단면적을 동일하게 하여 형상에 의한 압밀효과를 비교하고자 하였다. 점토시료는 액성한계 45.6%, 소성한계 20.1%, 소성지수 25.5, 비중 2.64의 해성점토를 사용하였다<표 1>.

<표 1> 시험에 사용된 배수재 및 점토시료

drain		soil	
cross shape	breadth : 5cm	liquid limit (LL)	45.6%
	Area : 3.84cm <sup>2</sup>	plastic limit (PL)	20.1%
band shape	breadth : 10cm	plastic index (PI)	25.5
	Area : 4cm <sup>2</sup>	specific gravity (G <sub>s</sub> )	2.64

<그림 4>는 재하와 동시에 소정의 시간간격으로 연직침하량을 측정하여 판형과 십자형배수재의 시간에 따른 압밀침하관계 곡선을 나타낸 것이다. 십자형과 판형의 최종 침하량은 각각 58.4mm와 57.5mm로 침하량이 비슷하게 나타났다.

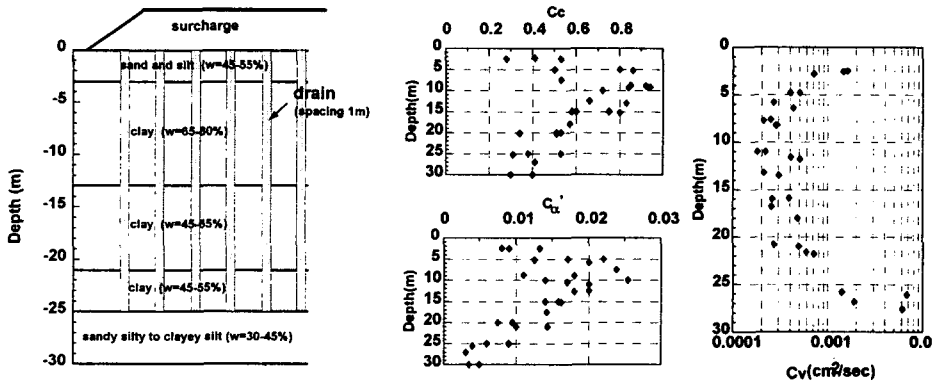


<그림 4> 시간에 따른 압밀침하량 (1.0, 2.0, 2.5kg/cm<sup>2</sup>)

### 3. 수치해석을 이용한 현장적용

관형배수재가 시공된 현장지역을 토대로 수치해석 프로그램을 이용하여 모델링하고, 관형배수재를 개량한 십자형배수재( $b=10\text{cm}$ )로 시공하였을 경우 압밀효과를 검토하였다. 본 해석을 위하여 사용된 수치해석 모델은 3차원 유한차분해석법을 이용한 MODFLOW(A Modular Three-Dimensional Ground-Water Flow Model) 컴퓨터 프로그램(McDonald and Harbaugh, 1988)이다.

해석을 위한 지역은 연약지반 처리공법의 결정을 위한 양산의 시험시공현장(1997, 한국토지공사)으로 Paper drain 공법을 선정한  $18,000\text{m}^2$ 의 부지중 MD88(드레인 간격 1m)배수재를 타설한  $2,250\text{m}^2$ 구역이다. 지반조사결과 시험시공부지 하부 대략 30m에는 약  $5\text{t/m}^2$ 의 피압수가 존재하고 지표면은 약 3m두께의 모래 또는 실트층이 있고 그 아래 약 25m두께의 실트질 점토층이 존재하는데, 실트와 점토 또는 얇은 두께의 모래층으로 번갈아 퇴적되어 있어 균질하지 않다(그림 5). 실내시험 결과 본 지역의 No.200 체 통과량은 거의 90%이상으로 세립분의 함유량이 매우 높은 점토로 구성되어 있다. 압밀계수(coefficient of consolidation,  $C_v$ )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 5> 현장의 지층 단면도와 깊이에 따른 압밀계수

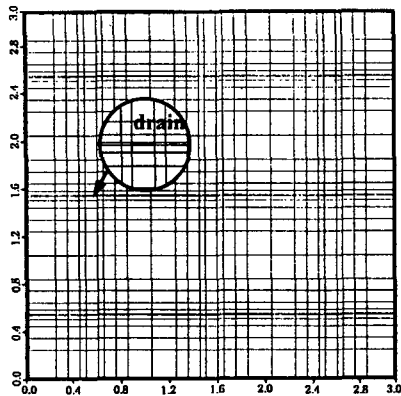
<표 2>와 <그림 6>은 수치해석프로그램의 입력자료와 격자망을 나타낸 것이다. 현장지반의 토질정수는 한국토지공사(1997)의 현장 지반자료를 토대로 하였고, 배수재의 경우 심도증가와 성토에 따라 가해지는 횡압을 고려한 실내시험을 통해서 수평방향 투수계수는 필터의 투수계수를, 수직방향 투수계수는 횡압  $3.0\text{kg/cm}^2$ 에서의 투수능으로부터 연직방향투수계수를 입력하였다. 평면 grid의 경우 배수재의 두께가 4mm임을 감안하여 배수재를 중심으로 세밀하게 격자를 나누어 1m간격으로 배수재가 위치하도록 하였고, 연직 격자의 경우 25m깊이까지 배수재가 타설되게 하였다.

<그림 7>은 배수재 주변의 수두포텐셜과 흐름벡터의 연직단면이다. 5m(단위중량  $2\text{t/m}^3$ )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 지난 후에는 90%이상이 소산되는 것으로 나타났다.

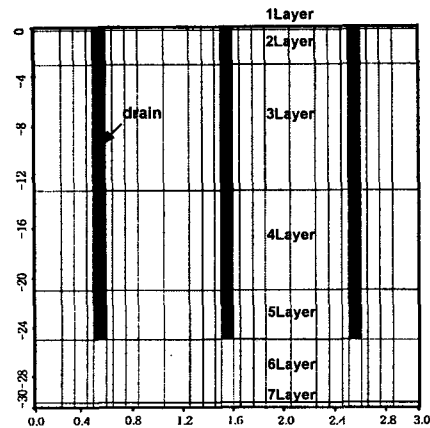
<표 2> 해석을 위한 입력자료와 경계조건

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

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

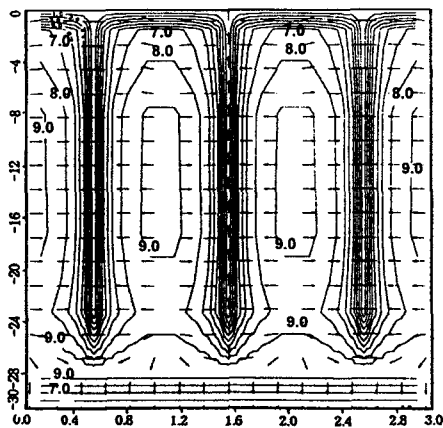


(a) 수평 grid (unit : m)

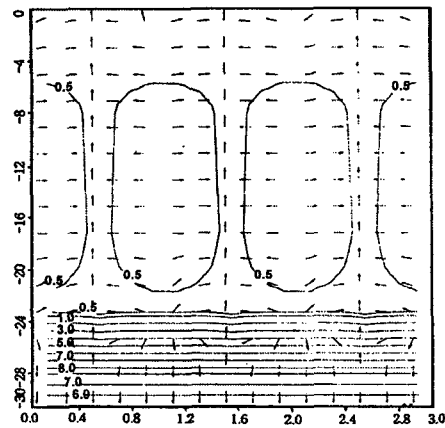


(b) 수직 grid (unit : m)

<그림 6> 해석을 위한 수평 및 연직 격자망



(a) 30일 후

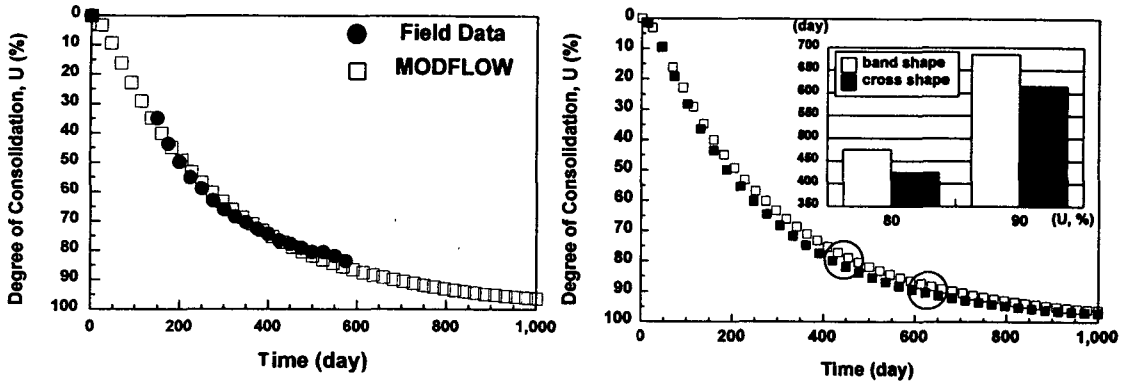


(b) 700일 후

<그림 7> 수직방향단면의 수두포텐셜과 흐름방향

<그림 8>은 MODFLOW프로그램의 과잉간극수압 소산시간으로부터의 압밀도와 현장 침하량으로부터의 구한 시간에 따른 압밀도를 비교한 그래프이다. <그림 10>으로부터 수치해석프로그램은 현장을 매우 유사하게 모사하고 있음을 알 수 있다.

<그림 9>는 수치해석에 의한 판형과 십자형 배수재의 압밀도-시간곡선으로, 십자형배수재를 타설하였을 경우 소정의 압밀도(80% 및 90%)에 도달되는 시간이 9~10% 단축되었다. 따라서 기존의 배수재를 십자형으로 개량하여 사용할 경우 소요 예정된 지반개량기간을 10%정도 단축 가능할 것으로 판단된다.



<그림 8> 현장실측자료와 수치해석 프로그램의 시간에 따른 압밀도 변화 비교

<그림 9> 수치해석에 의한 판형과 십자형 배수재의 압밀도-시간곡선

#### 4. 등가직경의 산정

배수재의 설계에 있어서 등가직경  $d_w$ 는 가장 중요한 변수중의 하나이다. 지금까지 많은 연구자들이 제안한 등가직경  $d_w$ 를 표3에 요약하였다.

<표 3> 문헌에 나타난 PBD의 등가직경 산정식

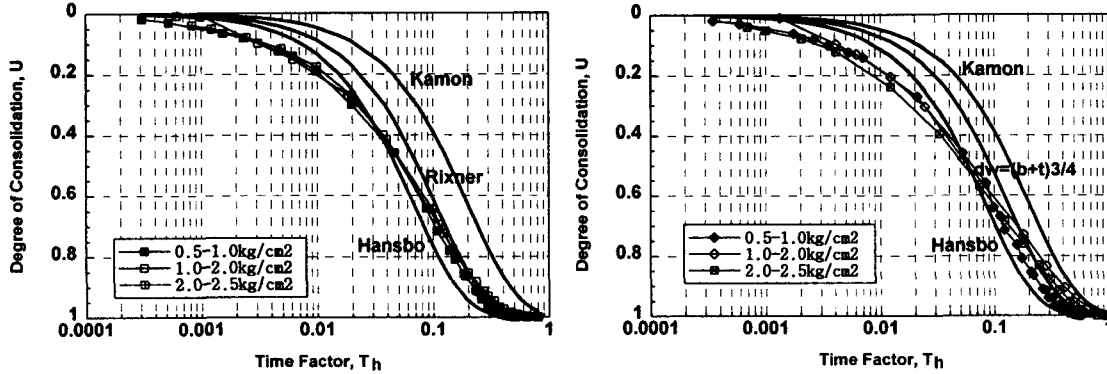
source	equivalent diameter
Hansbo(1979)	$d_w = \frac{2(b+t)}{\pi}$
Rixner(1986)	$d_w = \frac{b+t}{2}$
Kamon(1991)	$d_w = \sqrt{\frac{4bt}{\pi}}$

\* b is width and t is thickness of PBDs

<그림 10>는 원통형셀 압밀시험 결과로부터 산정한 판형 및 십자형( $b=5\text{cm}$ )배수재의 등가직경과 Hansbo(1979), Kamon(1991) 및 Rixner(1986)가 제시한 등가직경( $d_w$ ) 및 압밀도-시간계수의 관계를 비교한 것이다. 초기 압밀도 40%내에서 압밀시험으로 인한 시간계수는 Hansbo와 Kamon의 등가직경으로 계산한 시간계수보다 작게 나타났고, 판형배수재의 경우는 압밀도 80%이상에서 Rixner(1986)가 제안한 방법과 일치하였다. 단면적이 2배인 십자형배수재의 경우 등가직경은 판형배수재 등가직경의 2배에 십자형 중앙부의 수두손실을 고려하기 위해서 시행오차에 의해 압밀도-시간계수의 관계를 plot한 결과 실내시험곡선과 가장 유사한 계수  $\frac{3}{4}$ 을 곱하여 다음과 같이 산정되었다.

$$d_w = \frac{3}{4} \cdot (b+t) \quad (5)$$

실내시험을 통한 십자형배수재의 등가직경은 Hansbo(1979)의 배수재 둘레를 고려한 제안방법은 과대 평가되고, Kamon(1991)의 배수재 단면적을 고려한 제안방법은 과소평가되는 것으로 나타났다.



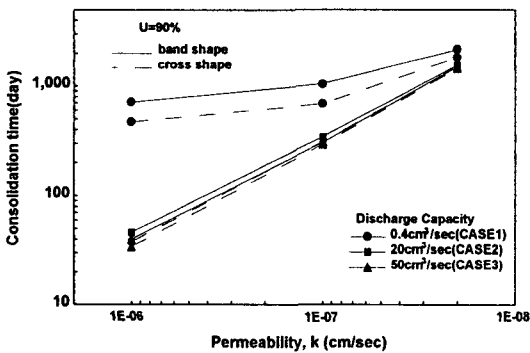
(a) 판형

(b) 십자형 (폭=5cm)

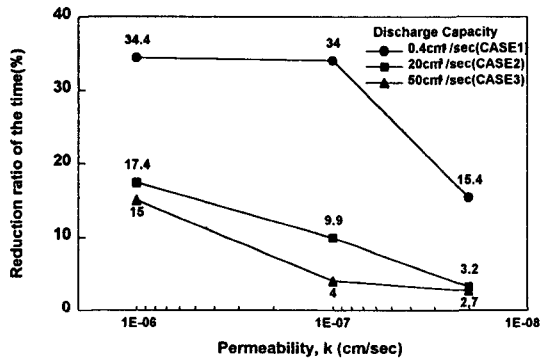
<그림 10> 실내시험을 통한 판형 및 십자형 배수재의 압밀도-시간계수의 관계

### 5. 통수능과 투수계수변화에 대한 압밀시간의 민감도해석

십자형배수재의 효율성을 평가하기 위하여 배수재에서 나타나는 여러통수능과 다양한 투수성을 갖는 점성토지반을 대상으로 민감도 해석을 실시하였다. 해석에 사용된 통수능은 0.4, 20, 50 cm<sup>3</sup>/sec이었으며 0.4 and 50cm<sup>3</sup>/sec은 문헌에 나타난 플라스틱 배수재가 가질 수 있는 최소 및 최대 통수능을 기준으로 하였고 20cm<sup>3</sup>/sec은 본 실내통수능시험으로 3.5kgf/cm<sup>2</sup>의 횡압을 가하여 구한 값이다. 점성토의 투수계수 범위는 10<sup>-6</sup> 에서 10<sup>-8</sup> cm/sec 범위의 값을 취하였다. 십자형 배수재를 이용하여 압밀도 90%에 소요 되는 시간을 밴드형 배수재의 경우와 <그림 11a>에 그리고 저감비율은 <그림 11b>에 비교 도시하였는데 십자형배수재를 사용한 경우 개발대상 점성토의 투수계수가 1×10<sup>-7</sup>cm/sec이상인 지반에서 배수재의 통수능이 크지 않은 경우(≈0.4cm<sup>3</sup>/sec) 십자형 배수재를 사용하면 압밀소요시간을 밴드형 배수재에 비교하여 30%까지 감소시킬수 있는 것으로 나타났다.



a) consolidation time



b) reduction ratio of consolidation time

<그림 11> 십자형과 밴드형배수재의 통수능과 지반의 투수계수 변화에 대한 압밀시간 변화

## 5. 결 론

PBD재(MD88)를 대상으로 십자형(cross shape)으로 개량하여 통수능시험과 원통형셀 압밀시험을 행하고, 수치해석프로그램 및 이론식을 사용하여 십자형배수재의 압밀촉진효과를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 통수능시험결과 동일한 단면적을 가진 십자형과 판형배수재의 통수능은 매우 유사하여 배수재의 형상에 따른 통수능의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.
- 2) 원통형셀 압밀시험결과 산정된 판형 배수재의 등가직경은 Rixner의 제안식에 유사한 경향을 보였고, 십자형 배수재의 등가직경은  $d_w = \frac{3}{4} \cdot (b+t)$  로 산정되었다.
- 3) 십자형배수재를 사용한 경우 개발대상 점성토의 투수계수가  $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$  이상인 지반에서 배수재의 통수능이 크지 않은 경우( $\approx 0.4 \text{cm}^3/\text{sec}$ ) 십자형 배수재를 사용하면 압밀소요시간을 밴드형 배수재에 비교하여 30%까지 감소시킬수 있는 것으로 나타났다.

## 참 고 문 헌

한국토지공사(1997), 양산 물금 시험시공 연구공사 중간보고서.

Hansbo, S.(1979), Consolidation of Clay by Band-shaped Prefabricated Drains, *Ground Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 16-25.

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.

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.

Pradhan, T.B.S. (1996), Efficiency of Consolidation and Evaluation of the Equivalent diameter for Cross Shaped Drain, *JSCE*, No. 554/III-37, pp. 221-230.

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.