

현장시험에 의한 Smear Zone의 평가

A Study on the Evaluation of Smear Zone by In-situ Tests

이 장 덕*¹ Yi, Chang-Tok

구 자 갑*² Koo, Ja-Kap

Abstract

To evaluate the smear zone caused by the drain installation, 10 piezometers were installed in the typical soft ground in the western coastal area of Korea. The dynamic pore water pressure developed during the drain installation was monitored using piezometers installed at a distance of 10cm, 20cm, 30cm, 40cm and 50cm from the location of the drain. The decay of pore pressure with time after pushing piezometers to depths of 5 meters and 7 meters during the drain installation was monitored to assess flow and consolidation characteristics of the soil after disturbance of the soil due to the drain installation. The drain installation results in shear strain and displacement of the soil and it decreases the permeability of the soil. Hence, the comparison between dissipation of the pore water pressure process in 10 piezometers before as well as after installation of the drain indicated the diameter of disturbance zone and smear zone, which is related to the cross-sectional dimension of the mandrel. In addition, Cone-pressuremeter(CPM) tests were performed to obtain rigidity index of the soil for an interpretation of the dissipation processes. It has been evaluated by in-situ tests that the smear zone is from 3.0 to 3.6 times of the cross-sectional dimension of the mandrel. The hydraulic conductivity expressed in terms of the coefficient of consolidation after the drain installation was calculated from 3 to 8 times decrease evaluated by Teh & Houlsby equation and CPM test results.

요 지

본 논문에서는 국내 서해안 연약 지반 현장에서 PBD 타설로 인한 교란 영역을 확인하기 위하여 현장지반에 10개의 간극수압계를 PBD 타설 위치로부터 10cm, 20cm, 30cm, 40cm 그리고 50cm 떨어져 설치하고 멘드렐을 이용한 PBD 강제 관입시 발생하는 과잉간극수압의 소산과정을 5m, 7m 깊이에서 측정하였다. PBD 타설로 인해 지반교란이 발생하면 연약점토 지반의 투수계수가 감소하게 되어 과잉간극수압의 소산시간에 영향을 미치게 되므로 PBD 타설거리로부터 PBD 타설 전후의 과잉간극수압 소산과정을 측정하여 Smear Zone의 범위를 정하였다. 또한 이러한 과잉간극수압 소산과정을 해석하여 PBD타설 전후의 지반 배수특성저하를 규명하였다. 과잉간극수압 소산을 해석하기 위하여 시험 지반의 강성지수가 필요한데 이러한 강성지수 측정을 위하여 Cone-Pressuremeter(CPM)시험을 병행하였다. 시험결과 멘드렐의 환산직경의 3.0~3.6배에 Smear Zone이 형성되는 것으로 조사되었으며 Teh & Houlsby의 식과 CPM을 이용한 수평압밀계수를 평가한 결과 PBD타설전후로 지반의 배수능력이 3~8배 저하된 것으로 계산되었다.

Keywords : CPM, Dissipation test, Hydraulic conductivity, PBD, Smear zone

*1 정회원, 두우건설엔지니어링, 연구소장 (Member, DooWoo Construction Engrg. Co. LTD., ctyii@hanmail.net)

*2 정회원, 국립 한양대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Hankyong National Univ.)

1. 서론

국내의 서해, 남해안에 분포하는 해성점토를 대상으로한 공사가 활발하게 진행되면서 연약 매립지반의 개량 및 강도증진을 위한 연직 배수재 공법이 많이 사용되고 있다. 연직배수재로 주류를 이루어왔던 Sand Drain은 주재료로 사용되는 모래 공급의 문제로 인하여 국내에서는 Paper Drain으로 알려져 있는 플라스틱 코아를 직물섬유 형태로 감싼 밴드 형태의 PBD(Plastic Board Drain)가 널리 사용되고 있는 실정이다. PBD 배수재는 멘드렐(Mandrel)에 연결하여 진동이나 타입식으로 설치하게 되는데 설치과정 중에 배수재 주위지반의 전단변위로 인해 지반교란이 발생하게 된다. 이러한 지반교란 영역은 멘드렐의 크기, 모양, Soil Macrofabric, 예민비, 설치방법 등에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Rowe 1968; Bergado et al. 1991). 이와 같이 PBD 설치로 인해 발생한 연약 지반의 교란 영역을 Smear Zone이라 하고 지반교란으로 인해 지반의 투수 계수의 감소로 이어져 PBD의 배수특성에 영향을 크게 미치고 있다. 따라서 이를 고려한 설계가 이루어져야 한다.

Barron(1948)은 일반적인 수평 압밀방정식을 제안하였으며, Hansbo(1979)는 Barron의 이론식에 Smear Zone의 범위와 교란 전·후의 투수계수 비 (k_h/k_s)로 Smear Zone의 영향을 고려한 압밀식을 제안하였다. 하지만 Smear Zone과 교란전후의 투수계수의 비를 신뢰성 있게 평가하는 것은 쉽지 않으며 이에 대한 연구가 최근에 계속되고 있다. Hansbo(1981)는 콘 시험의 이론적 해석을 통해 smear zone은 멘드렐 직경의 1.5배를 적용하였다. Bergado 등(1990)은 현장 계측결과를 Hansbo식과 FEM으로 역해석한 결과 $k_h/k_s=10$, Smear Zone은 멘드렐 직경의 2.0~2.5배를 제안하였다. 박영목(1997)은 멘드렐에 의한 배수재가 관입된 지반에서 1m 떨어진 지점에서 1m 깊이의 Pit를 굴착한 후 Pit로부터 수평시료를 채취하여 수평투수계수의 변화로부터 Smear Zone의 영향을 분석한 결과 멘드렐 직경의 5~7배에 이르는 것으로 발표하였다. 小林등(1990)은 실내시험을 통해 Smear Zone이 멘드렐 직경의 14배에 이르는 것으로 발표하고 있다. 이와 같이 Smear Zone의 범위만 하더라도 측정 방법에 따라 많은 차이를 보이는 것으로 분석되었다. 일반적으로 Smear Zone의 측정이 현장계측결과를 수평배수압밀식이나 FEM 방법과 비교하여 구하는 방법과 배수재 타설 이후 지반의 배수특성의 변화를 실내시험이

나 현장시험으로 측정하여 Smear Zone의 범위를 정하고 있는데, Bergado 등(1991)에 의하면 현장시험과 실내 시험으로부터 구한 투수계수가 15배 정도의 차이를 보이고 있어 지반 교란 전후의 투수특성 변화로 Smear Zone을 정하는 것은 많은 논란의 여지가 있을 수 있다. 그러므로 현장계측과 역해석으로부터 구한 Smear Zone이 멘드렐 직경의 2~3배의 값을 설계시 적용하는 것이 추천되고 있다(Chai et al., 1997; Bergado et al., 1991).

Smear Zone은 Soil Macrofabric과 예민비 이므로 연약지반의 형성특성에 따라 그 차이를 보이므로 PBD가 많이 시공되고 있는 국내 서해안 연약지반의 Smear Zone에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 본 논문에서는 국내 서해안 연약 지반 현장에서 PBD 타설로 인한 교란 영역을 확인하기 위하여 현장지반에 10개의 간극수압계를 PBD 타설 위치로부터 일정한 간격으로 설치하고 멘드렐을 이용한 PBD 강제 관입시 발생하는 과잉간극수압의 소산과정을 측정하였다. PBD 타설로 인해 지반교란이 발생하면 연약점토 지반의 투수계수가 감소하게 되어 과잉간극수압의 소산시간에 영향을 미치게 되므로 PBD 타설거리로부터 PBD 타설 전후의 과잉간극수압 소산과정을 측정하여 Smear Zone의 범위를 정하였으며, PBD타설 전후의 지반 배수특성저하를 규명하였다. 과잉간극수압 소산을 해석하기 위하여 시험지반의 강성지수가 필요한데 이러한 강성지수 측정을 위하여 CPM시험을 병행하였다.

2. 현장시험

2.1 지반조건

본 연구가 진행된 OO지구는 서해안의 대표적인 연약 지반 형태를 보이는 곳으로 주로 세립질의 실트질이 우세한 점토지반으로 흙의 분류법에 의하면 CL, ML로 분류된다.

현장시험이 수행되었던 지층구성을 보인 것이 그림 1이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 상부 연약층은 N치가 0~2정도의 매우 연약한 연경도를 보이는 실트질 점토가 심도 6.0m까지 분포하고 있고, 그 하부지층은 N치 5~6정도의 비교적 중간정도의 연경도를 보이는 실트질 점토가 분포하며 실트질 점토하부에는 N치 7이상인 실트질 모래가 존재하는 지층으로 구성되어 있다. 이렇게 3개로 구분되는 지층의 대표적인 시료에 대한 입도

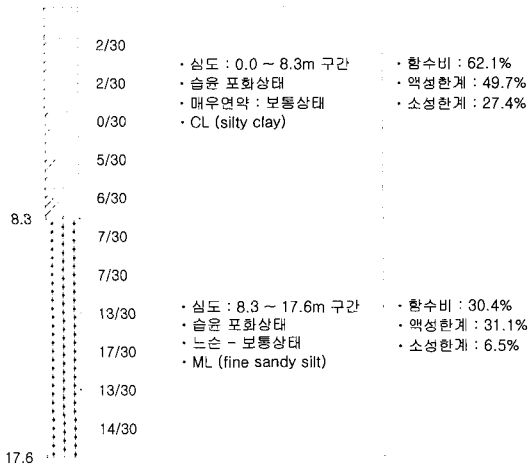


그림 1. 지층 개략도

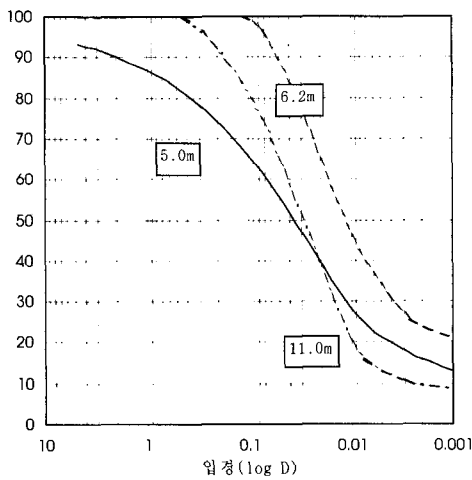


그림 2. 입도분포곡선

분포곡선이 그림 2인데, 그림에서 보는 것같이 실트질 성분이 우세하며 해류에 의해 형성된 퇴적 지층으로 부분적으로 불균질한 지층구성을 보이는 것으로 조사되었다. 현장시험은 상부실트질 점토층에서 이루어 졌으며 자연함수비가 액성한계보다 크거나 비슷한 상태로 정규압밀점토로 평가된다.

2.2 Smear Zone의 확인을 위한 시험

Smear Zone이란 수직배수제인 PBD타설시 점토의 교란영역을 말하며 이러한 교란영역의 범위 및 지반의 투수특성이 PBD설계에 영향을 미친다. Smear Zone의 영역을 확인하기 위하여 PBD타설로 인한 지반의 배수능력 저하가 어디까지 영향을 미치는지 그 영역을 확인함으로써 Smear Zone의 범위를 직접적으로 측정할 수 있도록 시험을 계획하였다.

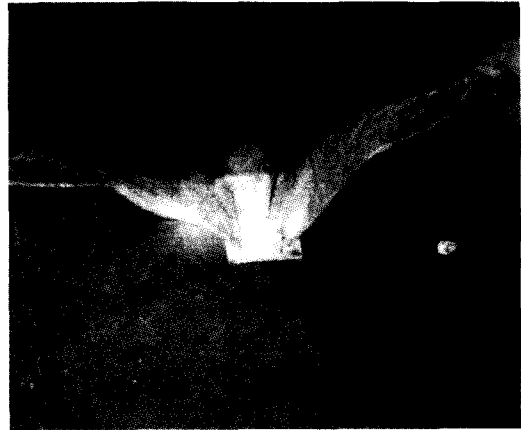


그림 3. 직사각형 멘드렐과 PBD

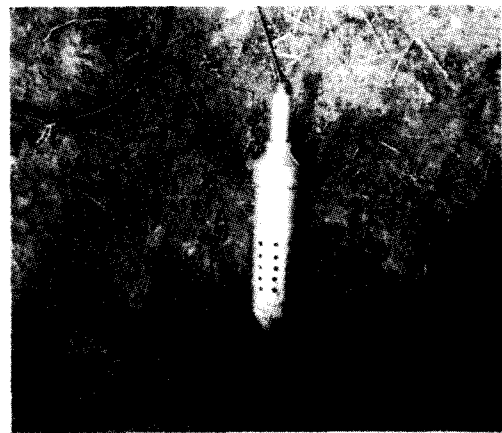
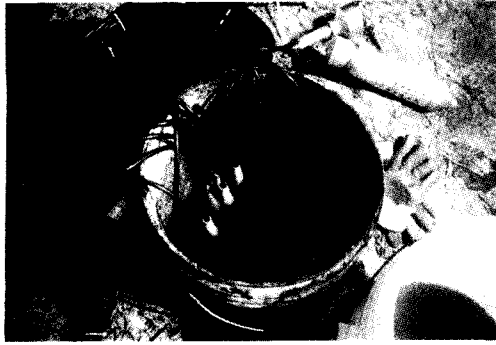
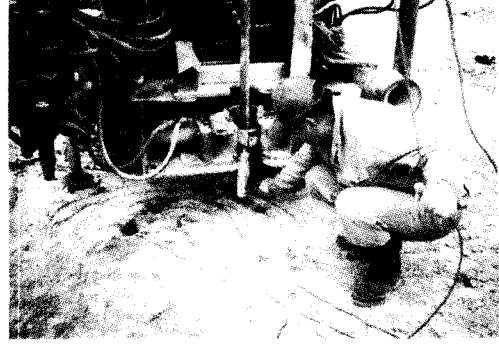


그림 4. 간극수압계

일반적으로 국내에서 사용하는 멘드렐은 직사각형 형태를 많이 사용하고 있어 그림 3과 같이 강성이 충분한 철판으로 제작한 10×15cm 직사각형 멘드렐을 이용하여 PBD를 지반에 관입하도록 하였다. 기존 연구에 의하면 멘드렐 관입시 지반교란영역은 멘드렐의 직경의 2~3배에 해당되므로 멘드렐의 환산직경인 13.8cm의 3.6배에 해당하는 50cm까지 간극수압계를 멘드렐 중심으로부터 10cm 간격으로 5개씩, 설치심도는 5m와 7m로 총 10개의 간극수압계를 설치하였다. 간극수압계는 그림 4와 같이 콘타입의 원통형 주물에 진동현타입의 간극수압계를 넣고 입자가 큰 모래로 채웠다. 콘타입의 원통형 주물에는 많은 구멍을 뚫어 지반속에서도 간극수의 측정이 원활할 수 있도록 하였다. 설치전 간극수압계는 포화시켰으며 원통형 끝단을 시추기 Rod에 연결하여 원하는 심도에 설치토록 하였다. 그림 5는 간극수압계의 포화과정과 간극수압계 설치 전경을 보인 것이며, 그림 6은 간극수압계 설치의 종단도와 평면도를 보

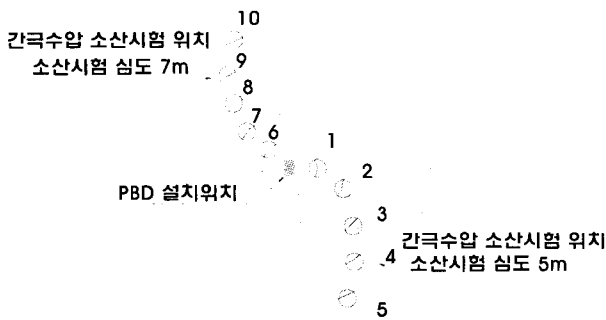


(a) 간극수압계 포화과정

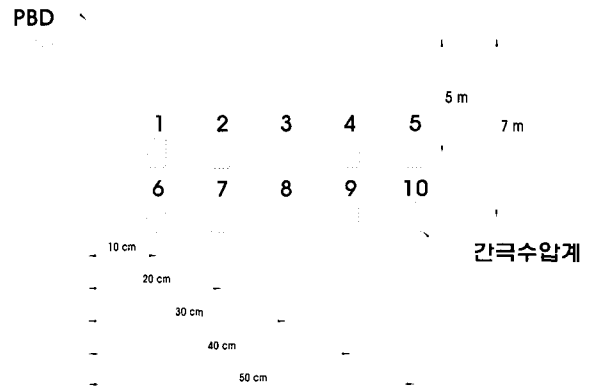


(b) 간극수압계 설치전경

그림 5. 간극수압계 및 설치전경



(a) 간극수압계 설치평면도



(b) 간극수압계 설치단면도

그림 6. 간극수압계 설치 위치도

인 것이다. 간극수압계의 설치위치는 지반교란이 PBD 타설 뿐만 아니라 인근의 간극수압계 설치시에도 지반 교란이 발생할 수 있으므로 간극수압계 설치시 설치위치가 최대한 이격되도록 배치하였다. 간극수압계를 콘 시험과 같이 2cm/sec의 속도로 밀어 넣을 때 간극수압계 주위에 과잉간극수압이 발생하게 되는데 이러한 과잉간극수압 발생과 소산과정을 12 channels data logger를 통해 과잉간극수압이 모두 소산되어 정수압 상태임을 확인한 후 멘드렐을 이용하여 PBD를 지반에 관입시켰으며, 관입속도는 간극수압계의 관입속도와 동일한 2cm/sec 정도로 관입하였다. 멘드렐 관입중 발생하는 과잉간극수압과 그 소산과정을 10개의 간극수압계에서 측정하도록 하였다. PBD 관입심도는 간극수압계가 설치되어 있는 7m 깊이까지만 하도록 하여 PBD가 관통한 경우와 관통하지 않은 경우의 지반교란정도에 대해 비교하고자 하였다. 이렇게 측정된 간극수압의 소산으로 PBD타설 전·후 지반의 투수특성 변화를 판단하여 Smear Zone의 범위를 판단하였다.

2.3 Smear Zone의 배수특성파악을 위한 시험

일반적으로 현장지반의 배수특성을 파악하기 위하여 CPT의 소산시험으로부터 지반의 배수특성을 추정할 수 있는데 시험위치의 정확한 정수압 상태와 지반의 적절한 강성지수가 요구된다. 그러나 대상지반이 압밀중이거나 지형적인 원인에 의하여 피압수가 존재할 경우 정수압외에 추가적인 잔류간극 수압으로 인해 해석상의 오류가 발생할 수 있다(Baligh & Levadoux, 1980). 하지만 본 현장의 경우 실트질점토 성분이 많아 간극수압의 소산이 비교적 빨리 정수압에 도달할 뿐 아니라 피압수 등의 영향이 없어 간극수압의 소산에 대한 해석상 오류는 없을 것으로 판단된다. 지반의 전단탄성계수와 비배수 전단강도의 비로 정의되는 강성지수(Rigidity Index, I_r)는 공동확장이론과 변형률 경로법을 이용하는 해석분야에서 중요한 요소이며 말뚝의 선단지지력 산정외에도 CPT를 이용한 압밀계수산정 등 다양한 분야에 적용된다. 간극수압의 소산을 통해서 점토의 수평압밀특성을

파악하는 방법에는 변형률 경로법(Strain Path Method)과 공동확장이론을 이용한 접근 방법으로 구분할 수 있다. Baliigh & Levadoux(1985)은 변형률 경로법으로 정규압밀 점토인 Boston Blue Clay에 대해 강성지수 500에 해당하는 변형률과 초기 과잉간극수압을 형성하고 소산과정을 모사함으로써 이론해를 제시하였다. 그러므로 이 결과는 강성지수가 500정도의 비슷한 지층에 적용되어야 하며 그렇지 않을 경우 측정된 수평압밀계수가 과대평가 될 수 있다. Houlsby & Teh(1988)은 변형률 경로법과 수치해석적 접근으로 지반의 강성지수에 따라 소산과정에 큰 영향을 미치는 것을 보고 강성지수를 함수로 하는 새로운 시간계수 $T^* = \frac{C_h t}{r^2 \sqrt{I_r}}$ 를 제안하였다. 그러므로 보다 신뢰성 있는 수평압밀계수의 산정을 위해서는 해석지반을 대표하는 강성지수를 선택하는 것이 매우 중요하다(Houlsby and Withers, 1988). 일반적으로 전단변형계수는 탄성계수와 포아손비로 구하는데, 탄성계수는 배수조건, 변형률 수준, 구속압 등에 따라 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 탄성계수는 삼축이나 일축 압축시험의 응력-변형률의 관계로부터 구하며, 지반의 비배수 강도 역시 삼축, 일축 실내시험이나 Vane 등 현장시험으로부터 구할 수 있다.

본 연구에서는 시험의 해석적 해가 존재할 뿐 아니라 시험 지반의 강성(Stiffness)과 강도 특성을 동시에 측정

하여 현장 지반의 강성지수를 측정할 수 있는 PMT (Pressuremeter Test)을 수행하였다. PMT에는 일반적으로 Pre-boring, Self-boring과 PIP(Push-in Pressuremeter)로 구분되는데, 시험결과의 신뢰성은 설치시 지반의 교란과 직접적인 관계가 있는 것으로 알려져 있다. CPM은 PIP타입의 일종으로 그림 7과 같이 콘시험기의 상단에 직경 4.0cm에 길이 43.5cm의 Pressuremeter가 설치되어 있다. 가압 Cell은 Mono Cell로써 질소가스로 가압되고 체적변화는 Membrane에 주입되는 물의 체적변화로부터 압력-체적변화 관계를 구할 수 있다. CPM시험은 콘을 관입시키면서 원하는 위치에서 Pressuremeter시험을 할 수 있으며, 본 PBD 시험현장에서는 심도 4.0m와 7.6m에서 2회 실시하여 지반의 강성지수를 현장시험으로부터 구하여 지반의 배수특성을 규명하였다. 그러나 강성지수는 콘 관입시 주변지반의 전단변형의 크기에 적합한 적절한 전단변형계수를 선택해야 하는데 Danziger 등(1997)은 다양한 변형률 수준에서의 전단탄성계수를 이용한 압밀계수 추정결과와 압밀실험결과를 비교하여 G_{50} 의 사용을 제안하였다. Rixner 등(1986)은 멘드렐을 이용 배수제를 관입하였을 경우 멘드렐 주위의 전단 변형률을 변형률 경로법을 통해 이론적으로 추정한 결과 멘드렐 주위에서 100%로부터 멘드렐 직경의 2~3배 떨어진 곳에서도 5%정도 큰 전단 변형이 발생한다고 하였다. 즉 멘드렐 관입으로 인한 Smear Zone의 전단변형률이 100~5%범위에 있으므로 본 연구에서 Smear Zone의 강성지수는 그림 12와 같이 변형률이 20~25%범위에서 전단 변형계수를 구하여 그림 11에서 구한 비배수 전단강도로부터 강성지수를 구하였다. 표 1은 CPM시험으로 구한 강성지수를 정리한 것이다.

3. 시험 결과 및 분석

3.1 소산 시험 결과 및 분석

총 10개의 간극수압계를 설치할 때마다 발생하는 간극수압의 변화 양상을 각각 측정하였다. 현장에서 지하수위는 지표면에서 -1.0m에 형성되어 있었으며, 그림 8은 1번 간극수압계를 설치하고 2번에서 10번까지 간극수압계를 설치할 때마다 1번 간극수압계에서 측정되는 간극수압의 변화를 보인 것이다. 간극수압계의 관입속도는 콘 관입의 일반적인 속도인 2 cm/sec로 하였는데도 급격하게 과잉간극수압이 발생하고 빠른 시간에 소

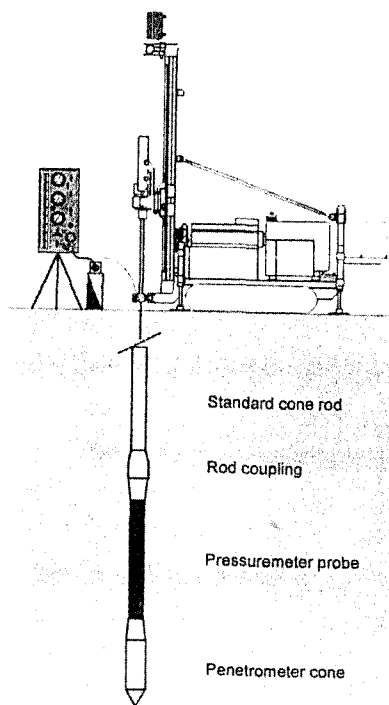


그림 7. 콘 프레스미터 시험기

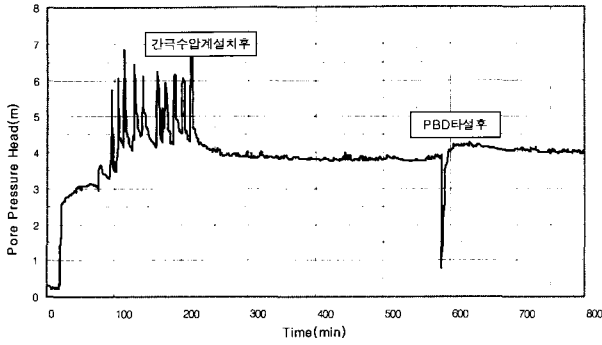


그림 8. 간극수압계 1번에서 측정된 간극수압 측정결과

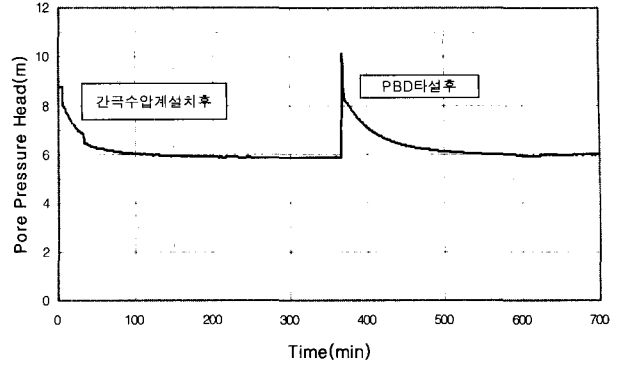


그림 9. 간극수압계 10번에서 측정된 간극수압소산 측정결과

산이 이루어지는 것을 볼 수 있다. 10개의 간극수압계 설치로 인해 발생한 과잉간극수압이 정수압 상태로 된 후 간극수압계 1에서 10cm 떨어진 곳에 PBD를 설치하였을 때 정수압보다 낮은 부의 간극수압이 발생하였다가 과잉간극수압이 발생하면서 소산이 이루어지는 것으로 계측되었다. 하지만 그림 9와 같이 PBD로부터 20cm 이상 떨어진 간극수압계에서는 이러한 현상이 관찰되지 않았는데, 이는 Lunne 등(1997)의 연구결과와 같이 실트질이 우세한 지반에서 콘이 관입될 때 콘 주위에 공동(Cavity)이 형성되면서 부의 간극수압이 발생하게 된다. 이와 같은 원리에 의해 실트질이 우세한 지반에 PBD가 관입될 때 멘드렐 주위에 공동이 형성되면서 부의 간극수압이 발생한 것으로 판단된다.

그림 9는 간극수압계 10번에서 측정한 간극수압계 설치시 발생한 과잉 간극수압과 PBD 설치시 발생한 과잉 간극의 소산과정을 보인 것이다. 이렇게 간극수압계 10개에서 측정한 간극수압계 설치시 과잉간극수압 소산과 PBD 설치시 발생한 과잉간극의 소산과정을 비교하여 PBD 설치로 인해 소산속도에 대한 변화가 있는가를 확인하였다. 그림 10에서 보는 바와 같이 과잉간극수압의 소산시점은 과잉간극수압이 최대 발생한 정점을 소산이 시작되는 기준으로 정하여 PBD 설치나 간극수압계 설치로 인해 발생한 과잉간극수압의 소산과정을 정수압을 기준으로 표준화하였다. 이러한 표준화된 과잉간극수압 소산과정을 각 간극수압계별로 PBD 설치 전후를 비교한 것이 그림 10이다. 그림에서 보는 바와 같이 5m 심도에 설치한 간극수압계에서는 PBD 설치가 과잉간극수압의 소산시간에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 하지만 PBD 설치위치로부터 50cm 이격된 간극수압계에서는 PBD 설치로 인해 지반의 배수 특성에 영향을 미치지 않는 것으로 조사되었다.

이러한 측정 결과로 PBD 설치로 인한 지반 교란의 영향 범위가 어디까지 미치는 가를 평가할 수 있다. 즉 PBD 설치위치로부터 40~50 cm사이까지 지반교란영역(Smear Zone)이 존재하는 것으로 평가할 수 있으며 10×15cm 멘드렐의 등가직경이 13.8 cm인 경우 교란영역을 멘드렐의 직경의 3.0~3.6배까지 교란영역으로 평가된다. 또한 그림 9에서 보는 바와 같이 7m 심도에 설치한 간극수압계에 측정된 과잉간극수압 소산과정을 보면 PBD 설치전후 지반의 배수특성은 변화가 없는 것으로 측정되어있다. 이러한 현상은 PBD 설치심도가 7m로 간극수압계가 설치된 심도까지만 PBD가 설치되어 PBD에 의해 지반교란이 발생하지 않기 때문인 것으로, 지반교란은 PBD가 지반을 관통할때 발생하는 것임을 확인할 수 있었다. 그러므로 PBD 타설은 지반교란을 발생시키고 이로 인해 지반의 배수능력이 감소되는 것임을 확인하였다.

3.2 배수능력저하에 대한 시험결과 및 분석

관입 중에 간극수압을 측정하는 CPT는 간극수압을 측정하는 휠터의 위치에 따라 서로 상이한 간극수압의 측정결과를 보이는 것으로 알려져 있다. 하지만 국내에서 사용되고 있는 대부분의 CPT는 U₂ 형태의 간극수압측정으로 휠터의 위치가 콘 끝상단 위에 위치하며 보다 신뢰성 있는 간극수압측정결과를 보이는 것으로 알려져 있다 (Robertson and Campanella, 1988). 본 현장에 적용한 간극수압계는 하부 콘타입부분이 막혀져 있어서 CPT의 휠터위치가 U₂형태에 가까운 형태인 것으로 판단된다. 소산시험에 의한 지반의 압밀특성을 파악하는 방법에는 크게 공동확장 이론을 이용한 방법(Torstensson, 1975)과 strain path method(Baligh & Levadoux, 1985; Teh &

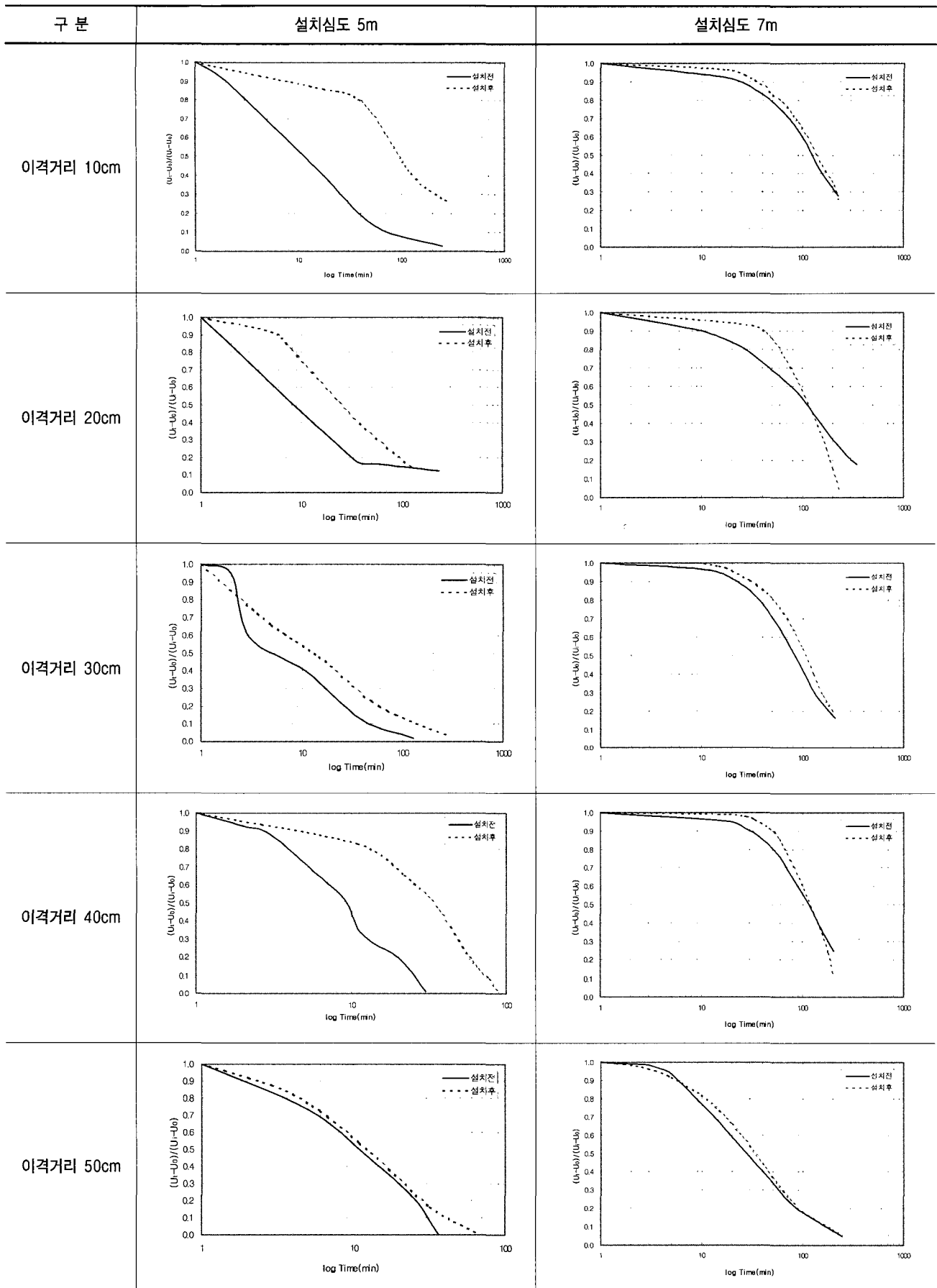


그림 10. PBDE타설 전후의 간극수압 소산시험 결과

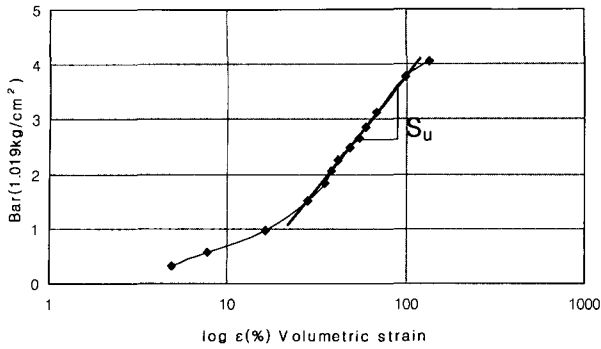


그림 11. CPM으로 구한 비배수 전단강도(4.0m)

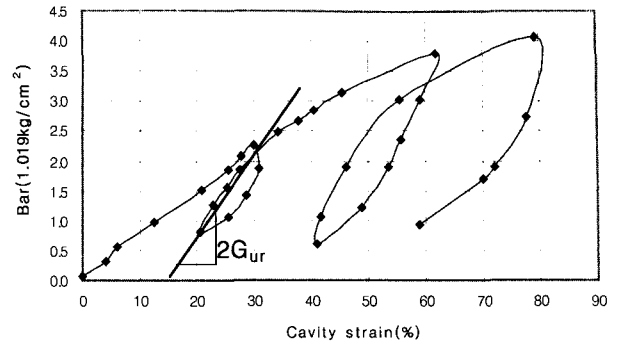


그림 12. 4.0m에서의 콘 프레스미터 시험결과

Houlsby, 1988)를 이용한 방법으로 구분할 수 있다. 김주형 등(2000)에 의하면 Torstensson 방법과 Teh & Houlsby 해는 비슷한 경향을 보이는 반면 Baligh & Levadoux 방법에 의한 해는 압밀계수를 크게 평가하는 경향이 있는 것으로 평가하고 있다. 본 연구에서는 Teh & Houlsby 방법으로 압밀특성을 평가하였다. Teh & Houlsby의 이론으로 수평압밀계수를 구하는 방법은 일반적으로 콘관입시 발생하는 과잉간극수압이 소산되는 과정을 strain path method와 비혼합 일차원 압밀해로부터 구하는 방법이다. 따라서 간극수압계 관입시 발생하는 과잉간극수압의 소산과정을 해석할 때 이 방법을 적용하는 것은 문제가 없으나 PBD타설시 일정 이격거리에서 발생하는 과잉간극수압의 소산과정을 해석할 경우 Teh & Houlsby의 이론을 직접 적용하는 것은 해석시 경계 조건에 따라 해석결과에 영향을 미칠 것으로 판단된다. Teh & Houlsby(1988)의 방법으로 수평압밀계수를 구하기 위해서는 지반의 강성지수가 필요하고 강성지수를 구하기 위하여 CPM시험을 수행하였다. 지반의 비배수 전단강도는 비배수 공동확장이론을 적용하고 지반을 탄소성으로 모델링하여 그림 11과 같이 CPM의 Pressure와 Volumetric Strain 관계를 Semi-log좌표에 그려 그 기울기로부터 비배수 전단강도를 구하였다. 또한 지반의 전단변형계수는 그림 12와 같이 Cavity Strain-Pressure 관계곡선의 기울기로 정의되는데 지반교란의 효과를 최소화하기 위하여 곡선 Loop 기울기를 사용하

표 1. 콘 프레스미터 시험결과

구 분	4.0m	7.6m
P _i (Limit Pressure)	3.7	2.15
S _u (kg/cm ²)	1.9	1.06
G _{ur} (kg/cm ² , Loop value)	5.75	4.6
강성지수 (Rigidity Index)	3.05	3.7

였다. 하지만 Loop의 기울기는 전단변형률에 따라 차이를 보이므로 실제 PBD 설치시 멘드렐 주위의 실제 발생하는 전단변형률 범위에서 구하는 것이 바람직할 것이다. Rixner 등(1986)은 멘드렐 주위의 변형률이 5~100%까지 발생하는 것으로 발표하였는데, 평균적으로 25%의 전단변형률에서 Loop의 기울기로부터 전단변형계수를 구하였다. 표 1은 CPM의 결과를 정리한 것이다.

Teh & Houlsby(1988)의 방법을 이용하여 소산시험으로부터 구한 PBD설치 전후의 수평압밀계수(C_h)값을 구하여 정리한 것을 표 2와 그림 13에 나타내었다. 표 2에서와 같이 교란되지 않은 지반의 수평압밀계수 $6.97 \times 10^{-3} \sim 9.54 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 와 비교할 때 지반교란으로 인한 수평압밀계수(C_h)는 $1.82 \times 10^{-2} \sim 7.55 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 으로 계산되어 PBD타설에 의해 3~8배정도의 압밀계수 감소가 있었던 것으로 판단된다. 그러나 PBD가 관통되지 않은 7m 심도에서는 수평압밀계수의 변화가 없는 것으로 나타나 PBD 타설심도가 지반교란과 직접적인 관계가 있는 것으로 조사되었다.

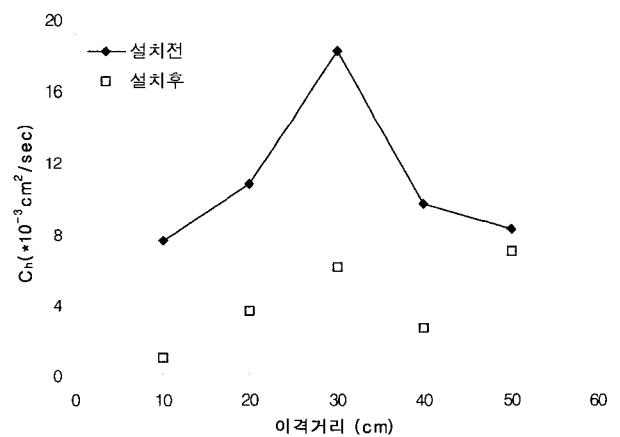


그림 13. PBD 설치 전후의 수평방향 압밀계수 (설치심도 5m)

표 2. 수평방향 압밀계수(C_h)산정 결과 (단위: cm^2/sec)

구 분	5m 심도		7m 심도	
	PBD 설치전	PBD 설치후	PBD 설치전	PBD 설치후
10 cm	7.55×10^{-3}	9.54×10^{-4}	8.34×10^{-4}	7.74×10^{-4}
20 cm	1.08×10^{-2}	3.62×10^{-3}	9.86×10^{-4}	9.43×10^{-4}
30 cm	1.82×10^{-2}	6.04×10^{-3}	1.28×10^{-3}	9.86×10^{-4}
40 cm	9.64×10^{-3}	2.59×10^{-3}	9.03×10^{-4}	8.67×10^{-4}
50 cm	8.24×10^{-3}	6.97×10^{-3}	4.02×10^{-3}	3.29×10^{-3}

4. 결론

본 연구에서는 현장에 PBD 타설전 계획한 PBD 위치로부터 일정한 거리에 10개의 간극수압계를 설치하고, 간극수압계와 PBD 설치시 발생한 과잉간극수압의 소산시험을 수행하여 PBD 타설에 의한 지반교란의 범위를 추정하였으며, 지반교란에 의한 수평압밀계수의 변화를 평가하여 PBD 타설에 의한 Smear Zone의 범위와 배수능력저하를 평가하였다. 또한 지반의 수평압밀계수 산정시 필요한 지반의 강성지수를 산정하기 위해 Cone Pressuremeter Test(CPM)을 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 주요 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 간극수압계를 5m와 7m의 심도에 설치하고 PBD 타설심도를 7m까지만 하였을 경우 5m에 설치한 간극수압계들에서는 PBD 타설에 의한 지반교란의 영향을 확인할 수 있었으나 7m에서는 PBD 타설전·후 지반의 교란이 발생하지 않은 것으로 측정되어 PBD가 지반에 통과관입되어야만 지반교란이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며 5m심도의 간극수압계에서 이러한 교란효과를 확인할 수 있었다.
- (2) 5m심도의 간극수압계에서는 $10 \times 15\text{cm}$ 의 멘드렐을 이용 PBD를 설치했을 경우 멘드렐에서 50cm 떨어진 간극수압계에서는 PBD 설치 전·후 지반교란에 의한 지반의 배수능력 저하는 측정되지 않아 멘드렐 환산직경의 3.0~3.6배에서 Smear Zone이 형성되는 것을 확인할 수 있으며 일반적으로 설계에 제안하고 있는 멘드렐 환산직경의 2~3배보다 크게 평가되었다.
- (3) Teh & Houlsby의 식을 통해 간극수압의 소산 결과로부터 수평압밀계수(C_h)의 PBD 타설전·후 값 변화를 계산하였다. CPM을 이용 전단변형률이 20~30%에서의 강성지수를 이용하였으며, PBD 설치에 따른 과잉간극수압의 소산과정이 Teh & Houlsby 경계조건

의 문제가 있을 수 있으나 PBD 타설로 인해 지반의 배수능력이 3~8배 저하된 것으로 계산되었다.

- (4) Smear Zone의 지역은 지반의 특성에 따라 영향을 받는 것으로 알려져 있으므로 국내 지반에서 일반적으로 적용할 수 있는 Smear Zone의 범위 규명을 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김주형, 김명모, 김영웅, 조성민(2000), "인천국제공항 부지 해성 세립토에 대한 CPTU와 DMT 결과 비교", 한국지반공학회 논문집, Vol.16, No.6, pp.23-33.
2. 박영목(1997), 국내 PBD제의 배수성능과 진공효과에 의한 통수능력 향상에 관한 연구, 한국지반공학회지, 제13권, 제2호, pp.39-53.
3. Barron, R.A.(1948), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells", Trans. ASCE, Vol.113, No.2346, pp.718-742.
4. Baligh, M.M.(1985), "Strain Path Method", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 111(GT9), 1108-36.
5. Baligh, M.M. and Levadoux, J.N.(1980), "Pore Pressure Dissipation after Cone Penetration", Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Cambridge, Mass., Report P80-11.
6. Bergado, D. T., Ahmed S., Sampaco, C. L., and Balasubramaniam A. S.(1990), "Settlements of Bangna-Bangpakong Highway on Soft Bangkok Clay", ASCE, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.116, No.GT1, pp.136-155.
7. Bergado, D. T., Asakami H., Alfaro M. C. and Balasubramaniam A. S.(1991), "Smear Effects of Vertical Drains on Soft Bangkok Clay", ASCE, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.117, No.10, pp.1509-1529.
8. Chai, J. C., Miura, N., and Sakajo, S.(1997), "A Theoretical Study on Smear effect Around Vertical Drain", *Proc. 14th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Engrg.*, Vol.3, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp.1581-1584.
9. Danziger, F.A.B., Almeida, M.S.S., and Sills, G.C.(1997), "The Significance of the Strain Path Analysis in the Interpretation of Piezocone Dissipation Data", *Geotechnique*, Vol.47, No.5, pp.901-914.
10. Hansbo S.(1979), "Consolidation of Clay by Band-Shaped Prefabricated Drains", *Ground Engineering*, Vol.12, No.5, pp.16-25.
11. Hansbo S.(1981), "Consolidation of Fine Grained Soils by Prefabricated Drains", *Proc. 10th ICSMFE*, pp.677-682.
12. Houlsby, G.T. and Teh, C.I.(1988), "Analysis of the Piezocone in Clay", *Proc. of the International Symposium on Penetration Testing*, ISOPT-1, Orlando, 2, 777-83, Balkema Pub., Rotterdam.

13. Hously, G.T. and Withers, N.J.(1988), "Analysis of the Cone Pressuremeter Test in Clay", *Geotechnique*, 38(4), pp.575-87.
14. Lunne, T., Robertson, P.K. and Powell, J.J.M.(1993), "Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice", SGI, Information & Marketing Dep.
15. Rixner, J. J., Kraemer, S. R., and Smith, A. D.(1986), "Prefabricated Vertical Drains", FHWA/RD-86/168, Federal Highway Administration, Washington, D. C., Vol.1.
16. Robertson, P.K. and Campanella, R.G.(1988), "Guidelines for Geotechnical Design Using CPT and CPTU", University of British Columbia, Vancouver, Department of Civil Engineering, Soil Mechanics Series 120.
17. Rowe, P.W.(1968), "The Influence of Geological Features of Clay Deposits on the Design and Performance of Sand Drains", *Proc. Inst. Civ. Engrs*, paper 7058-S, pp.1-72.
18. Torstensson, B.A.(1975), "Pore Pressure Sounding Instrument", Proceeding of the ASCE Specialty Conference on In-situ Measurement of Soil Properties, Raleigh, North Carolina, 2, 48-54, American Society of Civil Engineers (ASCE).
19. 小林正樹・水上純一・土田孝：粘性土水平方向壓密係數決定法, 運輸省港灣技術研究所報告, 第29券 第2号, pp.63-83, 1990.

(접수일자 2003. 7. 15, 심사완료일 2003. 11. 24)