

피조콘 소산시험을 이용한 연약지반의 압밀특성

Consolidation Characteristics of Soft Clay from Piezocone Dissipation Tests

윤길림*¹ Yoon, Gil-Lim

구자갑*² Koo, Ja-Kap

Abstract

Piezocone tests including the decay of excess pore water pressure generated were performed to investigate the consolidation behaviors at soft clay deposits located in west near-seaside of Korea. The sites were being stabilized as pilot test site by means of preloading method, two paper drain methods and pack drain method, to clarify which improvement method is suitable and efficient at the site. Piezocone tests were performed primarily before and after ground improvement works with boring, SPT and consolidation tests. The comparison of laboratory soil experiments and piezocone test data showed that there was significant ground improvement at the surface layer of the test site, but no consistent improvements at the layers below the surface layer deposits. In addition, an analysis of dissipation test data and consolidation test results indicates that the degree of consolidation was in good agreement between them, and consolidation coefficients estimated after the ground improvement were reduced at the locations improved by two paper drain and pack drain methods except preloading method. These results indicate indirectly the effects of ground improvement.

요지

서해안에 위치한 특정 연구현장에서 연약지반의 압밀거동을 파악하기 위한 소산시험을 포함한 콘관입시험을 수행했다. 연구현장에서 시험시공으로 적용한 연약지반개량 공법으로는 압성토공법, 두 종류의 페이퍼 드레인 공법, 팩 드레인 공법이었으며 각각의 공법들에 있어 현장에서의 지반개량에 따른 압밀거동을 판정하기 위해서 적용되었다. 콘관입시험은 근본적으로 지반개량 전과 후에 보링, 표준관입시험, 압밀시험과 함께 수행되었다. 실내실험과 피조콘관입시험을 비교한 결과, 연약지반의 표층에서는 상당한 지반개량효과가 있었으나 표층아래 심층지반에서는 그렇지 않았다. 그리고 지반개량 후, 10개월이 지난 시점에 압밀시험과 소산시험 결과를 통하여 분석한 수평압밀계수는 압성토 방법을 제외한 3가지 개량공법을 적용한 지점에서 압밀계수는 감소하여 개량효과를 간접적으로 판단할 수 있었다.

Keywords : Piezocone, CPT, Dissipation test, Consolidation, Soft ground, Clay soil improvements

*1 정회원, 한국해양연구소, 항만공학센터, 선임연구원

*2 정회원, 국립 한경대학교 토목공학과 부교수

1. 서론

최근에 국내에서도 양질의 부지가 부족하여 연약한 해안지반에 공단을 조성하는 공사가 급증하고 있는 추세이다. 이러한 건설공사에서는 연약지반을 개량하는 것은 필수 과정인데, 각 현장에 적합한 지반개량공법을 선정하는 일은 쉬운 작업이 아니다. 그러므로 본 공사 이전에 시험시공을 거쳐서 수많은 공법중에서 최적의 지반개량공법을 선정하게 된다. 최적의 개량공법을 선정하기 위해서는 시험시공에 적용된 각각의 공법에 의한 원지반의 개량효과를 판단하여야 한다. 지반의 개량여부를 판단하는 방법으로는 주로 원지반의 강도증가여부를 판별하거나 예측 압밀도를 산정하여 개량후의 압밀도를 평가하여 개량효과를 판단할 수도 있다. 국내 현장에서 주로 많이 이용되는 방법은 선별된 지반개량공법을 적용하고 시험시공현장에서 지반의 침하나 변형상태를 표시하는 현장계측시스템을 이용하여 지반개량여부를 평가하는 것이 비교적 신뢰성이 있는 방법으로 인식되고 있다. 그러나 이러한 현장계측 시스템도 항상 정확한 판단을 하는데 한계가 있는 것으로 알려져 있다. 예를 들면, 계측기의 설치시 문제, 계측기 자체의 오차, 자연환경의 급속한 변화 및 사람의 측정오차 등으로 어려움이 발생하게 된다. 그러므로 비교적 철저한 현장계측작업과 동시에 콘관입시험같은 현장원위치 시험으로 지반의 개량여부를 간접적으로 확인하는 연구가 요구된다.

지반개량으로 인하여 원지반의 변화정도를 나타내는 것은 주로 지반의 강도, 압축성 및 배수상태이다. 지반의 배수상태는 시료채취를 통한 실내 압밀시험으로 압밀계수를 산정하여 알 수 있으나 시료의 흐트러짐, 크기효과 및 시험오차 등으로 제대로 현장의 배수특성을 대변하기는 어려운 실정이다. 이러한 한계를 극복하기 위해서 현장에서 직접 측정하는 방법이 최근에 들어 지반공학자들의 많은 관심의 대상이 되고 있다. 현재 세계적으로 원위치 현장 시험으로 가장 많이 이용되고 있으며 비교적 정밀한 지반조사 방법중의 하나인 피조콘 관입시험으로 점토지반의 압밀계수를 측정하는 것은 경제적 측면뿐만 아니라 결과의 신뢰성 측면에서도 대단히 유용하다고 알려져 있다. 피조콘 관입시험에서는 콘의 관입을 일시 정지하고 과잉간극수압이 시간에 따라 소산하는 것을 이용하여 점토의 투수 특성이나 압밀특성에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이러한 소산시험결과를 이용하여 연약지반의 개량을 판별하는 연구는 국제적으로 많으나, 기존의 연구결과를 이용하여

산정한 압밀계수가 차이가 있어 국내 지반에 적용하기 위해서는 이에 대한 검토와 실내시험과 비교 분석을 통하여 가장 적합한 방법을 찾아내는 것이 필요하다.

본 연구에서는 최근 국내에서도 지반조사나 현장특성 파악을 위해서 많이 이용되고 있는 피조콘 시험을 이용하고 특히, 피조콘시험의 중요한 기법인 소산시험을 통하여 지반의 압밀거동 특성을 파악하여, 연약지반의 개량여부를 간접적으로 판단하는 기법을 고찰하고자 한다.

2. 연구현장의 지반조건 및 지반개량공법

연구현장은 서해안에 위치하고 있으며 공단조성을 위해서 부지 조성차 시험시공을 마치고 본격적인 지반개량공사를 수행하고 있는 해성토의 연약지반으로 이루어져 있다. 시추조사를 통한 지층별 구조는 매립층으로 두께가 1.5m-2.4m이며 그아래에 퇴적층으로 두께가 17m-18.5m이다. 이 층이 연구대상이 되는 층으로 실트질 점토, 점토질 실트, 모래 자갈층으로 이루어져 있다. 퇴적층 아래는 풍화토 및 풍화암층이 형성되어 있다. 본 연구에서 수행한 실내시험은 연약지반 처리 후, 시추조사에서 채취된 시료인 점성토층에 대해서 표 1과 같이 실내시험을 실시하였다. 자연함수비(w_n)는 비교적 변이성이 크며 심도가 깊어질수록 함수비가 작아지는 경향이다. 그 범위는 31.2%~58.7%이고, 비중(G_s)은 2.67~2.77, 그리고 액성한계는 30%~35%에서 변화가 거의 없는 상태이며 소성지수(PI)는 9.5%~14.6%의 범위에 있다. 또한 #200체 통과량은 거의 97%~99%로 나타났다.

통일분류법상 토질의 분류는 CL층이며 압밀시험을 통한 과압밀비(OCR)는 0.7 - 2.0의 범위에 있었으나, 삼축압

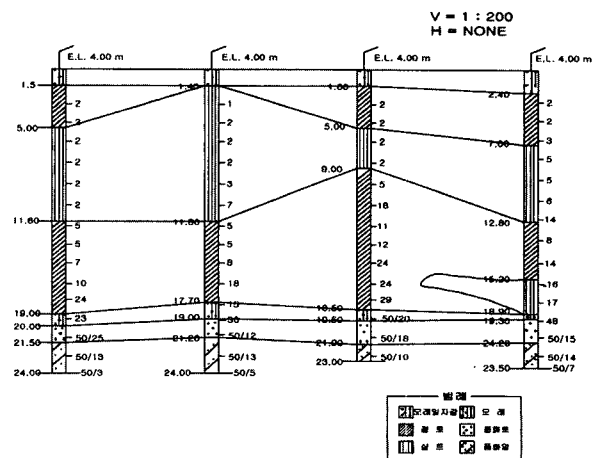


그림 1. 연구현장의 지층분류 및 토층 현황

표 1. 지반개량 위치의 토질시험자료

시 료 위 치		G _s	W _n	LL	PI	USCS	#200	2 μ	위 치
Pack drain 공법	5.0 ~ 5.8	2.72	41.14	29.80	11.55	CL	98.0	19	D
	7.5	2.76	33.02	29.70	10.98	CL	98.0	18	
	10.0	2.71	31.23	29.40	10.35	CL	97.8	13	
Paper drain 공법 (포켓식)	3.5	2.77	51.50	32.90	10.56	CL	98.8	-	B
	5.5	2.71	58.71	35.90	14.60	CL	98.4	20	
	7.5	2.72	36.53	30.40	12.72	CL	98.5	14	
Paper drain 공법 (접착식)	4.35	2.68	42.32	29.50	9.50	CL	98.8	13	C
	7.5	2.73	35.99	28.90	10.12	CL	98.7	16	
	11.5	2.67	32.82	29.20	10.78	CL	98.7	15	
Preloading 공법	4.5	2.71	4.66	29.80	10.90	CL	97.7	19	A
	7.5	2.74	39.95	30.50	1.52	CL	98.39	149	
	11.5	2.74	32.35	33.20	10.40	CL	99.4	31	

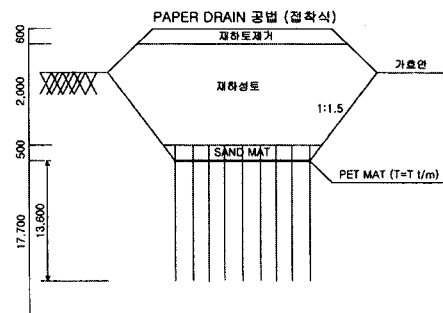


그림 2a. 페이퍼 드레인공법과 부지 배치도

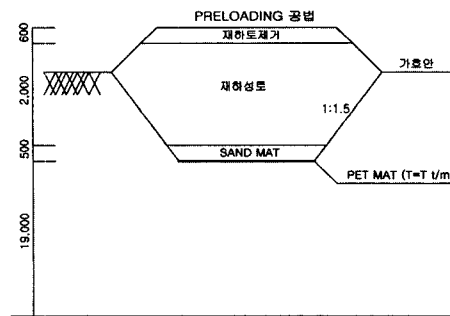


그림 2b. 사전재하공법과 부지 배치도

측시험시의 간극수압계수(A_v)는 0.8-1.3을 보였다. 그러므로 일부 층에서 과압밀된 현상도 존재하나, 전체적으로 연구 대상 연약지반은 거의 정규압밀상태(near - normally consolidated clay)로 판단되었다.

연구현장에서 적용한 연약지반처리방법으로 사전재하공법, 접착식 페이퍼 드레인 공법, 포켓식 페이퍼 드레인 공법 및 팩드레인 공법이 사용되었다. 사전재하공법은 연약지반상에 구조물을 구축하기에 앞서 구조물의 하중과 같도록 하거나 그 이상의 하중을 지반상에 미리 재하시

표 2. 지반개량공법의 현황

개량공법	연약층 두께 (m)	성토고 (m)	배수간격 (m)	개량기간 (month)	비고
Preloading	17.50	3.1	-	10	A
Paper Drain(포켓식)	16.90	3.1	1.6 x 1.6	10	B
Paper Drain(접착식)	16.20	3.1	1.6 x 1.6	10	C
Pack Drain	13.80	3.1	3.2 x 3.2	10	D

켜 연약한 토층의 압밀을 진행되도록 하여, 구조물 시공후의 잔류 침하를 가급적 적게 하는 동시에 지반의 강도를 증가시키는 공법으로 알려져 있다. 접착식 페이퍼드레인공법은 일반적으로 카드보드(card board)공법으로 알려져 있으며, 통수축진을 위한 카드의 코아와 필터가 접착된 배수재를 사용하는 것이고, 포켓식 페이퍼 드레인은 코아와 필터가 분리된 배수재를 사용하는 공법으로 시공성 및 경제성이 좋아 많이 이용되고 있다. 하지만, 지반조건 및 시공조건에 따라 통수유량에 차이를 보일 수 있는데, 이는 배수재의 형상에 따라 통수저항(well resistance)에 차이를 보일 수 있기 때문이다. 팩드레인 공법은 샌드드레인 공법의 개량공법으로 투수성이 있는 망상의 포대에 모래를 채워서 배수재로 이용하는 공법으로 샌드드레인공법의 배수재의 절단 및 변형에 의한 배수능력 저하를 최소화할 목적으로 개발된 공법으로 국내의 도로 성토지반에 많이 사용되고 있다.

접착식 및 포켓식 페이퍼 드레인 공법 구간에서 드레인재의 타입간격은 1.6m×1.6m이었고 타입심도는 각각 13.6m와 13.7m였다. 그리고 팩드레인공법인 경우에는 타입간격은 3.2m×3.2m이고 타입심도는 14m였다.

3. 피조콘 소산시험(Piezocone Dissipation Test)

연구현장에서 지반의 특성과 약 및 압밀거동 파악을 위해서 수행한 피조콘 관입시험은 국제적 표준인 ASTM (1979)이 제시하고 있는 방법에 의거하여 시험시공 전과 10개월이 지난 후에 수행하였다. 본 연구를 위해 수행한 콘관입시험은 일명 피조콘으로 알려져 있으며 콘관입 저항력(q_c), 선단 지지력(f_s) 및 콘의 관입과 함께 과잉간극수압(Δu)을 측정하는 것이다. 피조콘은 간극수압을 측정하여 토층의 중요한 특징인 압밀특성을 파악할 수 있으며 토층 사이에 존재할 수 있는 얇은 지층의 존재 유무를 파악하여 비교적 상세한 지반정보를 제공한다. 또한 관입 도중에 일정한 깊이에서 관입시 유발된 과잉간극수압을 소산시키면서 지층의 수평적인 압밀계수를 파악할 수 있으며 압밀도 등을 예측할 수도 있다.

국내에서의 피조콘과 관련한 연구사례로 김영상과 이승래(1998), 이승래와 김영상(1998)이 소산시험을 이용한 지반의 압밀특성을 규명하는 이론적인 연구를 일부 진행했다. 그리고 윤길림의 3인(1997)과 이선재의 2인(1998)은 콘관입시험을 이용하여 국내 지반의 비배수 전단강도에 대한 콘지수를 남해안 해성점토를 이용하여 현장 배인 시험과 비교하여 산정하는 연구를 비롯하여 국내 지반에 적합한 토질분류법을 개발하는 기초연구를 수행하기도 했다.

그림 3은 성토직업을 끝낸뒤에 10개월이 지난 시점에 각 지반개량공법을 적용한 연구현장에서 수행한 피조콘 소산시험의 모식도이다. 성토재하 높이는 3.1m를 기준으로 하였고 성토기간은 매일 0.31m씩 10일이 소요되었다.

일반적으로 연약지반개량에 대한 개량효과 판별을 위

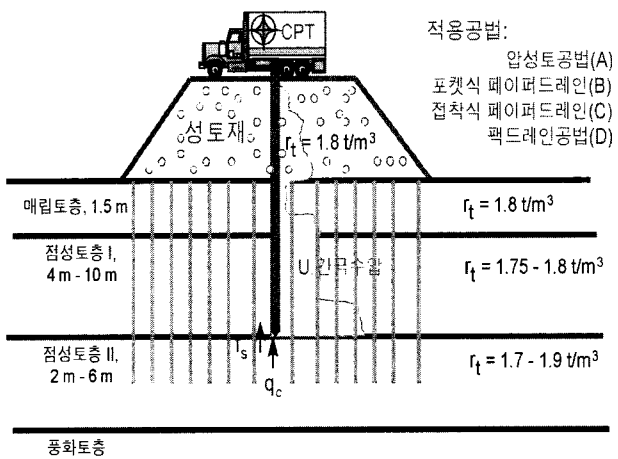


그림 3. 지반개량 후에 압밀 거동파악을 위한 피조콘 시험 도식도

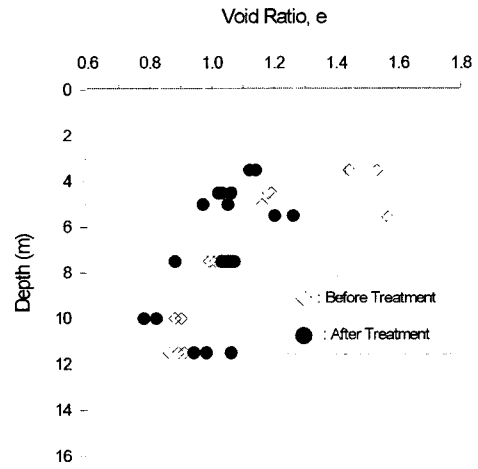


그림 4 지반개량전과 개량후의 간극비의 변화

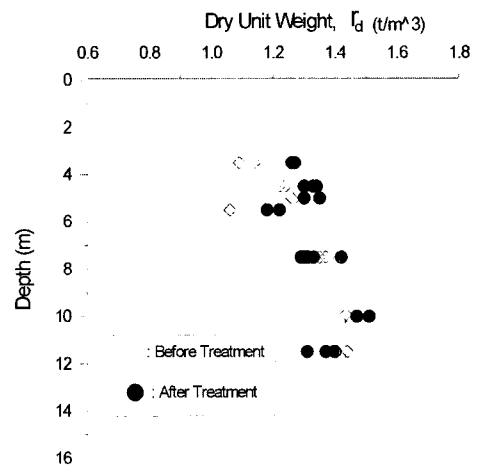


그림 5. 지반개량전과 개량후의 단위건조중량의 변화

한 연구는 보통 지반 개량전의 원지반과 개량후의 지반에서 불교란시료를 채취하여 실내시험을 이용하거나, 직접 원위치 시험을 통하여 원지반의 강도 및 배수상태에 대한 변화를 판단하게 된다. 본 연구에서는 지반의 개량에 따라 변화하는 지반의 간극비와 단위중량의 변화를 그림 4와 5에 나타냈다. 그림 4에서는 전체적으로 심도 4m - 6m까지는 지반개량후에 간극비의 감소를 확인할 수 있었다. 그림 5에서 건조단위중량은 전반적으로 그림 4의 간극비와 같은 경향을 보이고 있다. 특히 지반개량으로 원지반의 표층부분인 심도 약 3m - 6m까지는 압밀이 상당히 진행되어 지반개량이 된 것을 알 수 있다. 하지만 심도 약 12m근방에서는 지반개량 후의 간극비나 단위중량이 증가하거나 감소한 이유를 다양한 원인으로 찾을 수 있으나, 성토로 인한 압밀하중의 영향이 크게 미치지 않은 것과 보통 토질이 가지고 있는 특유한 공간적 변이성(spatial variability), 제한된 채취시료의 한계, 실험오차 및 시료의 교란 등으로 발생

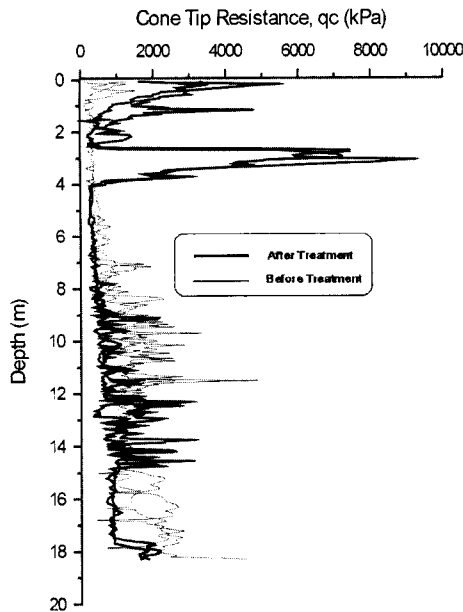


그림 6. 지반개량 전과 후의 깊이별 콘관입 선단지지력(q_c)자료

한 결과로 설명될 수 있겠다.

연구현장에서 지반개량 전후에 수행한 피조콘 시험으로 얻은 지반의 강도를 표시하는 콘의 선단지지력(q_c)은 그림 6에 표시했다. 그림에서 지반개량 후의 표시된 깊이는 성토고(3.1m)를 제외한 깊이를 나타낸 것이다. 그림 6에서 콘저항치 q_c 를 비교해보면, 지반개량 전과 후에 원지반 아래 4m까지는 지반강도의 증가는 있으나, 나머지 층에서는 오히려 지반개량 후에 지반강도가 오히려 깊이별로 일부 증가되거나 감소된 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통해서 알 수 있는 것은 콘의 선단저항치인 q_c 로 지반개량효과를 직접 판단하기에는 일부 성토 지반 바로 아래에서는 가능하나, 연약지반이 두꺼운 지반에서는 전체적으로 어려움이 존재한다고 판단된다.

결국, 성토로 인한 압밀하중 및 수직배수재의 설치로 원지반이 압밀이 일부 진행되었음 불구하고 깊이에 따른 지반개량은 일관성 있게 진행되었다고 판단하기에는 어려움이 존재하였다. 그러므로 본 현장에서는 압밀의 진행에 따른 개량정도를 콘의 선단저항치 하나만의 자료를 가지고는 평가하기가 어렵다고 할 수 있다. 한국토지공사(1997)의 보고서에서도 4공의 표준관입시험(SPT)을 수행하여 토층 아래 17미터까지 조사한 결과, 전반적으로 지반강도가 증가하는 경향을 보였으나, 지층 깊이 10m 이하에서는 오히려 강도가 줄어든 경우도 있어, 본 연구결과와 매우 유사한 결론을 얻었다.

지금까지 실내에서 수행하는 압밀시험 과정을 현장에서 모사하는 방법으로 알려진 피조콘 소산시험을 통한 압

밀계수의 측정은 특정 깊이에서 콘의 관입을 일시정지하고 관입으로 발생한 과잉간극수압이 시간에 따라서 소산되는 정도를 측정함으로써 이루어진다. 하지만 실내 압밀시험은 주로 1차원적인 수직적인 유체흐름을 표현하며 수평적인 유체흐름은 무시하고 있으나, 피조콘 소산시험은 대부분이 수평적인 유체흐름의 상태를 측정한다. 그리고 소산시험으로 얻은 압밀계수는 피조콘으로부터 유추한 다른 물성치들처럼 다른 실험들과 연관성을 통해서 획득한 경험적인 관계가 아니라, 현장에서 직접 측정하여 얻어진 자료를 이용하여 구하므로 신뢰도가 높은 것으로 알려져 있다.

이러한 과정으로 산정한 압밀계수는 현장 시료채취로 얻은 작은 크기의 시료로 실내 압밀시험에 의하여 얻은 압밀계수보다 현장에 존재하는 실트 또는 모래층에 의한 부분 배수조건을 잘 반영할 뿐만 아니라, 시료채취에서 오는 교란효과를 줄이므로 매우 경제적이며 신뢰성이 있다고 알려져 선진국에서는 실무에서 많이 적용되고 있다. 그러나 아직까지 국내에서는 피조콘의 다양한 용도가 존재함에도 불구하고 그리 활발하게 적용하고 있는 실정이 아니다.

피조콘 시험에서 구하는 압밀계수는 수평 압밀계수를 의미하며 지반개량의 배수증진을 촉진하기 위하여 수직 배수재의 설계시 매우 중요한 정보를 제공할 수 있는 것으로 알려져 있다(Baligh & Levadoux, 1980). 일반적으로 피조콘시험 결과로부터 압밀계수를 산정하기 위해서는 콘관입시 발생된 과잉간극수압이 최소한 50%정도가 소산될 때까지 소산실험을 수행하면 비교적 오차가 적은 현장 수평 압밀계수를 산정할 수 있다(Baligh & Levadoux, 1980).

피조콘 소산시험을 통하여 얻을 수 있는 것은 수평 압밀계수 외에 현 상태의 잔류평형간극수압을 관측할 수 있으며, 이를 이용하여 지반의 압밀상태를 파악한다. 이를 위해서는 콘의 관입으로 유발된 과잉간극수압이 대부분이 소산되어 특정치에 수렴할 때까지 소산시험을 수행하여야 한다. 일반적으로 과잉간극수압이 소산되는 현상을 나타내는 곡선은 식 (1)과 같이 표현되며 정규화된 과잉간극수압을 대수시간에 대하여 나타낼 수 있다.

$$U_t = \frac{u(t) - u_o}{u_i - u_o} = \frac{\Delta u(t)}{\Delta u_i} \quad (1)$$

여기서, U_t 는 정규화된 과잉간극수압,

$u(t)$ 는 시간 t 에서의 간극수압,

u_i 는 시간 $t=0$ 일 때의 초기 간극수압,
 u_o 는 지하수위에 따른 정수압.

Torstensson(1975)은 실린더형과 구형 공동팽창이론을 이용하여 간극수압 소산시험을 통한 압밀계수(C_v) 추정 방법을 식 (2)와 같이 제안하였다.

$$C_v = T_{50} \times R^2 / t_{50} \quad (2)$$

여기서, R은 등가 원추 반지름,
 t_{50} 은 50% 압밀도까지의 간극수압 소산시간,
 T_{50} 은 시간 t_{50} 에 대한 시간계수.

Torstensson는 지반이 초기에 등방 응력상태에 있고 완전 탄소성 거동을 한다고 가정하여 공동팽창이론으로 초기과잉간극수압(u_i)을 추정하였다. 그는 50%의 압밀도에서 예측치와 실측치가 가장 근사하다고 제안하였으며 압밀계수를 추정할 때는 압밀도 50%에서의 소산시간(t_{50})과 그에 상응하는 시간계수(T_{50})를 사용할 것을 추천하였다. 그러나, Torstensson의 해석방법은 압밀과정의 비선형성, 콘선단각과 다공질 필터 위치의 영향, 그리고 콘관입에 따른 흙의 교란 등은 고려하지 못했다. 그리고 추정된 압밀계수가 정규압밀영역에 대한 추정값인지 아니면 과압밀영역에 대한 값인지를 정확히 나타내지 못하였다.

Torstensson은 콘주변의 압밀은 주로 수평방향 압밀계수(c_h)에 지배되며 수직방향 압밀계수(c_v)의 변화는 전체 압밀과정에 별 영향을 주지 않으므로 간극수압 소산시험을 통해 결정되는 값은 수평방향 압밀계수 c_h 임을 제안하였다. 실제 현장에서 측정된 압밀계수와와의 비교를 통하여 압밀도 50%에서의 값인 T_{50} 과 t_{50} 을 사용하는 것이 가장 정확한 결과를 얻는다고 제안하였다.

잘 알려진대로 피조콘 소산시험은 측정 전에 콘의 뒤(behind the tip)에 위치한 간극수압 측정용 피조미터(piezometer)의 다공질 필터를 완전히 포화시키는 것이 매우 중요하다. 왜냐하면, 제대로 포화시키지 않으면 측정자료의 오류가 상당히 심하며 특히 일부 팽창성 토층에서 발생하는 마이너스 간극수압이 완전포화의 미비로 자주 발생한다. 이러한 점을 상기하여 본 연구현장에서는 시험시공 전에는 그리세린(glycerin)을 이용하고 지하수위에 도달하기 전에 멤브레인을 씌워서 포화상태를 유지되도록

표 3. 성토 직후에 발생한 초기 과잉간극수압

위치	매립층을 포함한 성토고(m)	단위중량(t/m^3)	초기 과잉간극수압(t/m^2)
A	3.95	1.8	7.11
B	3.90	1.8	7.02
C	4.95	1.8	8.91
D	4.00	1.8	7.20

하여 불포화로 인한 소산시험의 오류를 대비하였다. 지반 개량후의 실시한 콘관입 시험시 이용한 포화방법은 약 24시간 다공질 필터를 포화용 토조(suction box)를 이용하여 실내에서 포화시킨 후, 현장에서 지하수위 위의 표층을 미리 보링 굴착한 후에 물로 침투시킨 후에 콘을 관입하고 간극수압을 측정했다.

본 연구논문에서 분석하고자 하는 것은 지반의 압밀특성 변화과정에서 지반개량 전과 후에 압밀도의 변화를 피조콘 소산시험을 통한 간극수압을 소산과정을 이용하여 압밀거동을 평가하는 것이다. 즉, 콘관입시험시 발생하는 초기과잉간극수압과 잔류과잉간극수압을 가지고 압밀도를 평가한다. 다음 식 (3)과 같은 개념으로 판별할 수 있다.

$$\text{압밀도(\%)} = \frac{\text{초기과잉간극수압} - \text{현재과잉간극수압}}{\text{초기과잉간극수압}} \quad (3)$$

하지만 초기의 과잉 간극수압을 측정하는 것은 쉽지 않다. 본 현장은 연약한 점토지반이 주로 존재하므로 개량하고자 하는 원지반의 위에 성토를 한 후에 즉시 나타나는 과잉간극수압을 의미한다. 성토로 인한 지반을 비배수 조건으로 가정하여 판단하면, 초기 과잉간극수압은 성토높이에 성토재의 단위중량을 곱하여 산정할 수 있으며 실용상 적용 가능하다. 본 연구에서는 초기 간극수압 u_i 는 콘관입 때 발생하는 간극수압(u_{bi})이며 정수압(u_o)의 측정은 매우 많은 시간을 필요로 하기 때문에 지하수 위치는 원지반의 표층에 존재하고 깊이에 따라 직선으로 증가하는 것으로 가정하여 계산한 정수압을 사용하였다. 각각의 지반 개량공법에 성토한 높이와 측정된 성토재의 단위중량을 가지고 판정한 각각의 초기과잉간극수압은 표 3에 있다.

그리고 압밀도를 평가하기 위해서는 원지반에서 성토매립후, 압밀방치기간 10개월이 지난 시기의 원지반에 잔류하는 과잉간극수압이나 현재의 잔류과잉간극수압을 예측해야한다. 그래서 보통 콘관입시험의 소산과정을 마친다면, 잔류과잉간극수압은 지하수의 위치에 따른 정수압에 수렴한다고 가정하게된다. 하지만 성토 후에는 원래

표 4. 성토 후에 산정한 잔류 과잉간극수압

위치	원지반에서 소산시험깊이 (m)	잔류 평형간극수압 (t/m ²)	잔류 과잉간극수압 (t/m ²)	정수압(t/m ²)
A	5.35	9.52	4.17	5.35
B	4.32	8.40	4.08	4.32
C	2.75	8.51	5.76	2.75
D	4.23	8.40	4.17	4.23

표 5. 성토 후 원지반의 압밀도

위치	초기 과잉간극수압 (t/m ²)	잔류 과잉간극수압 (t/m ²)	압밀도 (%)
A	7.11	4.17	41.35
B	7.02	4.08	41.88
C	8.91	5.76	35.35
D	7.20	4.17	42.08

지중에 존재하는 정수압과 성토로 인하여 발생한 과잉간극수압을 더한 값에 수렴하게 된다. 그러므로 이를 이용하여 성토후 일정한 시간이 지난 후에 과잉간극수압을 측정하여 원지반에 성토 후의 압밀도를 판단하게 된다. 이러한 배경에서 성토 후에 원 지반에 존재하는 잔류 과잉간극수압은 다음 표 4와 같다.

그러므로 표 4의 분석자료를 이용하고 방정식 (3)을 이용하여 성토 후의 원지반 압밀도를 판별할 수 있으며 그 결과는 다음 표 5와 같다.

성토 후의 원지반의 압밀도를 평가한 결과, 대부분이 35% 이상의 압밀도를 보이고 있으며 성토고가 비교적 높은 C위치에서 비교적 낮은 압밀도를 보이고 있다. 그리고 수직 및 수평 압밀계수와 수직 및 수평투수계수를 비교하기 위하여 시험결과에서 $P_o + \frac{\Delta p}{2}$ 에 대응하는 하중단계의 값을 확인한 결과, 표 6과 같이 나타났다. 표 6에서 보는 바와 같이 수평 및 수직 압밀계수의 비는 1.18~2.39정도로 이는 일반적인 수평 및 수직 압밀계수비 보다는 적은 경향을 나타내고 있으며, 수평 및 수직 투수계수 비는 0.98~2.11정도로 보이고 있다.

5. 피조콘 소산시험 결과의 분석

피조콘 시험을 수행할 때에 이루어지는 소산시험의 결과를 이용하여 연약지반의 압밀 특성을 파악하고 지반개량 시 배수조건에 따른 지반의 침하 특성을 잘 반영할 수 있다. 특히 현장에 존재하는 실트 및 모래층에 의한 부분 배수

표 6. 깊이별 압밀계수 및 투수계수

개량공법	Depth (m)	토층깊이 (m)	압밀계수(C _v) (cm ² /sec)x10 ⁻³	투수계수(K _v) (cm/sec)x10 ⁻³	위치
Pack Drain	2.4	2.4	-	-	D
	7.0	4.6	23.5	12.03	
	16.2	9.2	5.95	1.943	
	Ave	-	11.80	5.362	
Paper Drain (포켓식)	1.6	1.6	-	-	C
	4.5	2.9	6.78	6.407	
	6.5	2.0	4.76	5.323	
	18.5	12.0	8.34	4.190	
Ave	-	7.65	4.705		
Paper Drain (접착식)	1.5	1.5	-	-	B
	11.8	10.3	8.88	5.190	
	17.7	5.9	26.10	4.770	
	Ave	-	15.15	5.037	
Preloading	1.5	1.5	-	-	A
	6.0	4.5	16.40	10.500	
	9.5	3.5	27.60	6.318	
	19.0	9.5	16.60	4.229	
Ave	-	18.72	6.259		

Note: "-"은 측정하지 않은 결과를 의미한다.

조건을 잘 반영하는 것으로 알려져 있다. 지반개량의 효과를 판단하기 위해서는 지반의 수평적인 압밀계수를 식 (2)를 이용하여 산정하여 결정할 수 있다. 본 연구에서 적용한 이론적인 시간계수는 지반의 강성지수와 Skempton의 간극수압계수에 영향을 받으나, 보통 강성지수 100과 간극수압계수 0.8을 사용하였다(FHWA, 1988).

그림 8과 9는 지반개량 전과 성토후 10개월이 지난 시점에 수행한 소산시험을 수행하여 얻은 결과이다. 각 현장에서 시행한 간극수압 소산시험의 대표적인 결과로서 정규화된 과잉간극수압이 대수시간에 대하여 도시되어 있다. 피조콘 소산시험은 많은 연구자들의 경험을 토대로 판단해보면, 소산시간에 따른 과잉간극수압의 소산결과를 시간에 대해 정규화하여 압밀도를 예측하도록 되어 있으나, 일반적으로 많은 소산시험결과가 비정상적 경향(non-standard curve)가 존재한다. 그림 7에 나타난 소산시험의 특성은 간극수압용 계측필터가 콘뒤(behind cone tip)에 위치한 경우(u₂), 소산초기에 간극수압이 증가하는 경향을 보이는 것을 Mandel - Cryer effect로 불리우며 이러한 현상은 보통 피조콘 다공질 필터의 포화상태가 불충분하거나, 지반의 고유한 공간적인 변이성 및 토질의 흡인력 때문에 발생된다고 알려져 있다. 그리고 과압밀된 점토의 경우에는 원추면과 원추뒷면에서 간극수압 차이가 크기 때

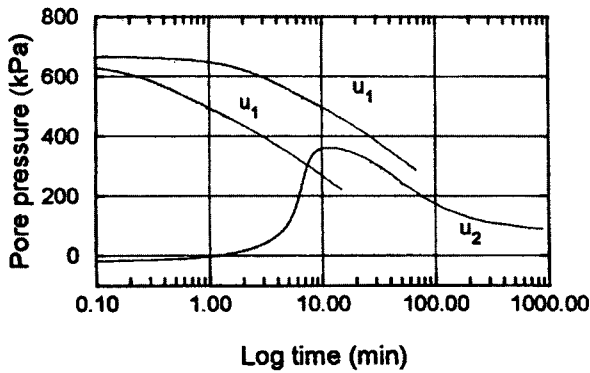


그림 7. 피조콘 소산시험에서 피조미터 위치에 따른 과잉간극수압의 소산거동 (after, Lunne, Robertson and Powell, 1998)

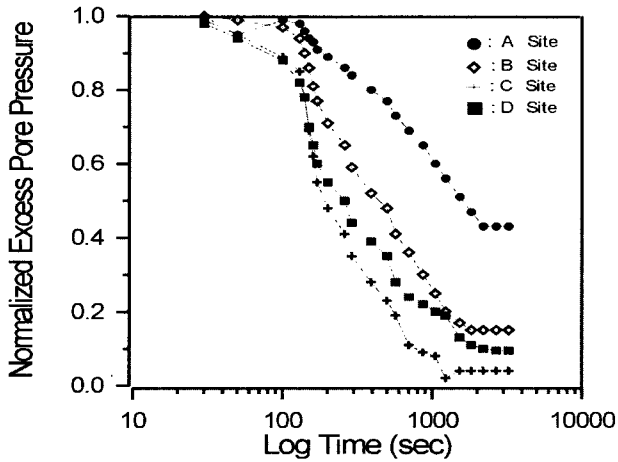


그림 8. 지반개량 전의 소산시험을 정규화된 결과

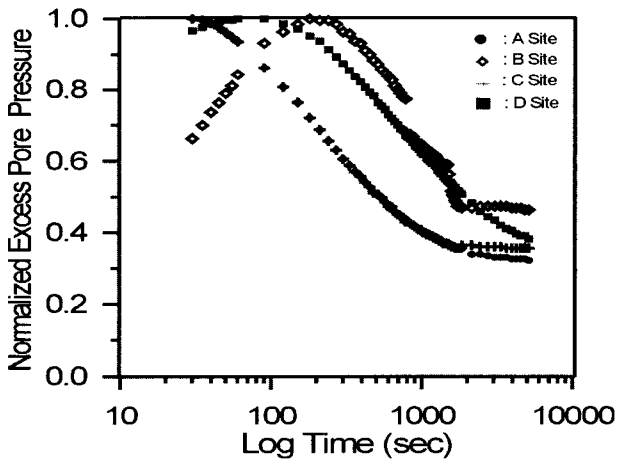


그림 9. 지반개량 후의 소산시험을 정규화된 결과

문에 콘관입이 정지된 후에, 과잉간극수압이 평형상태에 이르기 위해서 발생하는 응력 재분포(redistribution) 현상에 주로 기인한다(Sully & Campanella, 1994). 이러한 현상은 특히 불포화토에서 주로 발생하는데 흙의 간극이 주위 공극을 흡입하려는 고유의 흡입력(suction force)이 발현

되기 때문이다. 불포화토에서 응력 재분포현상은 콘이 관입되면서 콘선단부분에서 발생하는 양의 과잉간극수압이 소산시험을 위해 일시 멈추면, 콘 관입에 따른 응력의 영향권 밖에는 여전히 흙의 간극수압을 유지하고 있게 된다. 하지만 일정한 시간이 흐르면서 과잉간극수압이 응력권 밖과 안에서 평형을 이루면서 초기에 간극수압의 일시적인 증가현상이 일어나게 된다.

Sully & Campanella(1994)는 소산시험결과를 이용하여 압밀도를 평가하는 경우에 보통 과압밀토나 흙의 흡입력 등으로 발생하는 초기 소산곡선이 증가하는 경우 즉, 비정상적인 소산곡선(non-standard curve), 소산과정중에 발생하는 최대과잉간극수압을 이용하여 과잉간극수압을 정규화하여 압밀도를 산정하도록 추천하고 있다. 그리고 이로 인하여 발생하는 시간의 차이(time lag)은 소산시험의 초기를 최대간극수압이 발생하는 시간만큼 이동하여 계산하도록 추천하고 있다. 본 연구에서도 이러한 학자들의 권고사항을 이용하여 소산시험곡선을 정규화하였으며 압밀도를 예측하였다.

그림 8의 소산형태는 모두 초기에 과잉간극수압의 증가현상이 약 30초가 있었으며 그 후에 소산되는 형태이다. 소산위치 A를 제외하고 나머지 세 위치에서 측정된 결과는 매우 유사한 소산형태를 보이고 있다. 그림 8의 현장 B에서는 깊이 10.3m에서 지반개량 전에 수행했으며, 콘관입을 멈춘 직후에 발생한 최대 초기과잉간극수압은 26.07 t/m^2 였으며, 소산시험 시작 후 약 750초가 지난 후에는 잔류과잉 간극수압이 3.93 t/m^2 이 되어 과잉간극수압의 소산이 50%를 초과하여 소산시험을 끝냈다. 압밀도 50%를 표시하는 소산시간은 C위치 자료에서 가장 빠른 200여초이며 가장 늦은 시간은 A위치로 약 1070초였다. 이러한 사실로 판단해도 본 지역의 지반형태가 지반조사 결과에서도 보인 것처럼 위치별로 공학적으로 서로 매우 유사한 실트질 점성토 지반이라도, 압밀특성은 서로 상당한 차이를 보인다는 점이다. 이러한 차이에 대한 설명을 정확히 답변하기에는 한계가 있겠지만, 그중에서 지반이 가지고 있는 다양한 불확실성에 미치는 변수들중에서 지반고유의 공간적 변동성(Intrinsic spatial variability)이 얼마나 지반상수 결정에 영향을 미치는 지를 단적으로 보여주는 예라 하겠다.

그림 9은 단순압성토공법(A), 페이퍼드레인 공법(B, C)과 펌프드레인공법(D)으로 지반을 개량한 후 10개월이 지난 시기에 수행한 결과며 지반개량 전 수행한 소산시험의 위치에서 매우 근접한 지점에서 피조콘 소산시험을 수행하여 얻은 결과이다. 그림에서 알 수 있는 사항은 20mm/sec

표 5 피조콘 소산시험으로 예측한 수평압밀계수

	압밀시간 및 수평압밀계수				비교
	개량 전		개량 후		
지반개량공법	$t_{50}(\text{sec})$	$C_{h0}(\text{cm}^2/\text{sec})$	$t_{50}(\text{sec})$	$C_{h1}(\text{cm}^2/\text{sec})$	C_{h1}/C_{h0}
압성토 (A)	1070	0.015	450	0.037	2.43
포켓식 페이퍼드레인 (B)	400	0.042	1080	0.016	0.38
접착식 페이퍼드레인 (C)	220	0.076	450	0.037	0.49
팩드레인 (D)	300	0.056	1080	0.016	0.29

속도의 콘관입을 일시 정지하여 수행하는 소산시험에서 모든 시험결과가 개량 전의 시험결과와 유사하게 초기에 과잉간극수압의 상승이 있었다는 점이다. 이는 앞에서 설명되었지만 지반의 과압밀도나 토질자체의 불포화로 인한 흡인력에 대응해서 발생될 수 있는데, 본 지역에서 수행한 실내시험결과, 압밀도가 전체적으로 과압밀성이 크지 않았고 피조콘 저항치도 전형적인 정규압밀형태를 보인 사실에서 판단하면 결국은 지반의 고유한 특성이나 혹은 불포화토(unsaturated soil)에서 존재하는 토질자체의 점토성분이 가지고 있는 흡인력(suction force)이 있기 때문이라고 이유를 설명할 수 있겠다.

그림 9의 A는 압성토공법만을 가지고 지반 개량하는 위치인 현장에서 깊이가 9.30m(원지반경우, 5.35m)에서 10개월이 경과한 후에 수행한 결과이다. 깊어 9.30m에서 콘관입을 마친 직후에 발생한 최대 초기과잉간극수압은 26.19 t/m^2 였으며 소산시험 시작 후, 5000초가 지난 후에 초기과잉간극수압이 9.52 t/m^2 이 되어 대부분의 과잉간극수압이 소산되어 정수압에 수렴하는 것으로 판단되어 소산시험을 끝냈다.

식 (2)와 그림 9의 소산시험결과를 이용하여 연구 대상 지역을 비배수 조건으로 가정하여 개량 후, 10개월 지난 시점의 수평압밀도를 평가했다. 여기서 평가를 위하여 지하수의 위치는 원지반의 표층과 같다고 가정했으며 3.1m의 성토하중으로 발생한 과잉간극수압은 성토재의 단위중량에 성토고를 곱하여 산정했다. 하중전달개념차원에서 판단하면, 소산시험의 수행위치에서 성토로 인하여 완전히 과잉간극수압이 발현되었다고 가정하기에는 한계가 있으나, 지반개량후의 압밀도를 예측하는 것과 실무적으로 이용하는 점에서 충분히 가치가 있다고 사료된다.

표5에는 지반의 개량전후에 수행한 소산시험의 결과와 식 (2)을 이용하여 산정한 압밀계수를 나타냈다. 표5에서 알 수 있는 내용은 압성토구간을 제외하곤 나머지 구간에서 상당한 압밀계수의 감소가 있었다. 압밀계수의 감소가 항상 지반의 개량효과라고 판단하기에는 이론적으로 어

려운 점이 있으나, 성토하중으로 인한 지반의 침하와 이와 동시에 간극비의 감소 및 콘마찰력의 증가 등으로 판단해 보면, 지반개량은 일관성이 있는 것으로 판단된다. 여기서 주의해야할 점은 수직배수재를 설치한 지점에서는 일관된 압밀계수의 감소가 있었으나, 수직 배수재를 설치하지 않은 지반에서는 오히려 압밀계수가 증가하였다. 지반개량효과를 판단하기에는 한계가 있는 것으로 판단되므로 소산시험에 대한 수직 배수재의 영향범위에 대한 연구가 반드시 필요하다고 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 현장에서 많이 사용되는 4가지 연약지반 개량공법에 대한 지반의 압밀거동을 파악하기 위해서 시험시공 현장에서 수행한 다양한 지반조사 및 피조콘 소산 시험 결과를 분석하여 다음과 같은 연구결과를 얻었다.

- 1) 피조콘 시험 자료인 선단 지지력(qc)을 이용하여 연약 지반의 압밀특성을 분석하는데, 본 연구현장과 같이 연약한 점토층이 두께가 매우 두껍고 지반강도가 매우 작은 점성토 지반에 있어서는 심층에서의 지반개량 효과를 판단하는데 오류를 범할 수 있다. 왜냐하면 표층지반의 개량효과는 확인할 수 있으나, 심층지반의 개량효과를 판단하는데는 상당한 어려움이 존재하므로 추가적인 다양한 지반조사 장비를 이용해야 한다.
- 2) 피조콘 소산시험으로 산정한 원지반의 압밀계수는 실내압밀시험 결과와 상호 비교한 결과, 비교적 일관성 있는 결과를 제시했으나, 실내압밀시험으로 구한 압밀계수는 시료 채취시 오차, 측정 및 분석시 오차 등으로 인하여 일관성 있는 압밀계수를 나타내지 못하여 현장 원위치 시험인 피조콘 시험의 장점을 확인할 수 있었다.
- 3) 지반개량공법으로 인하여 개량지반의 압밀계수를 소산시험으로 산정한 결과, 적용한 개량공법 가운데, 단순 압성토구간을 제외한 페이퍼 드레인구간 및 팩드레인

모두 압밀계수의 감소를 보였다. 이는 원지반의 압밀진행으로 원지반의 투수계수가 감소한 것으로 판단되어 지반의 개량을 간접적으로 판단할 수 있었다.

- 4) 지반개량 전후에 수행한 소산시험 수행시 간극수압용 필터의 포화를 제대로 시켰고 지반의 과압밀비가 크지 않았음에도 불구하고, 소산초기에 모두 과잉간극수압의 상승한 다양한 이유가 존재한다고 판단되나, 정확한 이론적 설명은 아직 정립되지 못했으며 추가적인 연구가 필요한 분야로 판단된다.

감사의 글

본 연구 논문은 논문 심사자의 건설적인 비평과 세심한 검토가 없었다면 불가능했을 것으로 판단됩니다. 심사하신 분들의 세심한 배려와 격려에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김영상, 이승래, "콘 선단부 뒤에서 관측된 간극수압 소산곡선을 이용한 수평압밀계수 추정," 한국지반공학학회, 제 14권, 제 4호, pp. 141-149, 1998.
2. 이승래, 김영상, "피에조콘 소산시험을 이용한 현장 간극수압 소산거동 예측," 대한토목학회 논문집, 제 18권, 제 3호, pp. 353-359, 1998.

3. 이선재, 정충기, 김명모, "피에조콘을 이용한 국내 지반 흙의 분류," 한국지반공학학회 지, 제 14권, 제 4호, pp. 163-176, 1998.
4. 윤길립, 지성현, 이용길, 이영남, "CPT를 이용한 비배수전단강도 평가" '96 한국지반공 학회 가을학술세미나, pp. 321-326
5. 윤길립, "과압밀된 점토지반을 위한 실험상관식의 개발, 대한토목학회지 논문집 제 16 권 제 3.1호, pp. 61-71, 1996.
6. 한국토지공사(1997). ○○국가공단 연약지반 침하안정관리 시험시공 최종보고서
7. 황대진, 김철웅, (1997), "피에조콘의 간극수압 소산시험에 관한 연구" 한국지반공학학회 지, 제 13권 6호, pp. 25-36.
8. ASTM, (1979), Standard Method for Deep Quastic-Static Cone and Friction Penetration Tests of Soils, D3441, American Society of Testing Materials.
9. Baligh, M. M., & Levadous, J. N., (1980), Pore Pressure Dissipation after cone Penetration, MIT, Civil Engineering Report 80-1.
10. FHWA, (1988), Guidelines for Using the CPT, CPTU and Marchetti DMT for Geotechnical Design, Report No. FHWA-PA-87-022-84-24.
11. Lunne, T., Robertson, P.K. and Powell, J.M. (1998), "Cone Penetration Testing for Geotechnical Practice", Blackie Academic & Professional, Lodon.
12. Sully, J.P., Campanella, R.G., (1994), "Evaluation of Field dissipation data in Overconsolidated fined-grained soils" Proceedings, 13th Inter. Conference on Soil Mechnnics and Geotechnical Engineering, New delli, pp. 201-204
13. Torstensson, B.A., (1975), "The Pore Pressure Sounding Equipment", ASCE Specialty Conf. on In-Situ Measurement of Soil Properties, Raleigh, NC, pp. 48-55.

(접수일자. 1999. 5. 14)