

소산 실험을 이용한 관입 장비의 교란 효과 추정

Evaluation of Disturbance Effect of Penetrometer by Dissipation Tests

윤형구* · 홍성진** · 이우진*** · 이종섭****

Yoon, Hyung-Koo · Hong, Sung-Jin · Lee, Woojin · Lee, Jong-Sub

Abstract

The penetration of the probe produces the excess pore pressure due to the disturbance. The objective of this study is to evaluate the disturbance zone by using the dissipation of the excess pore water pressure, which was generated due to the penetration of the penetrometer with different size. The CPT, DMT and FVP (Field Velocity Probe) are adopted for in-situ tests. The tests are carried out in the construction site of north container pier of Busan new port, Korea where is accelerating the consolidation settlement using plastic board drains (PBD) and surcharges by crushed gravels. The coefficient of consolidation (C_h) and soil properties are deduced by the laboratory test. The in-site tests are performed after the predrilling the surcharge zone at the point of 90% degree of consolidation. To minimize the penetration effect, the horizontal distance between penetration tests is 3m, the change of the pore pressure is monitored at the fixed depth of 24m. The coefficient of consolidation (C_h) and the t_{50} s are calculated based on the laboratory test and the in-situ data, respectively. The equivalent radii based on the t_{50} shows that the FVP and the DMT produce the smallest and the greatest equivalent radii, respectively.

Keywords : consolidation, CPT, DMT, effective radius, field velocity probe, pore pressure dissipation

요 지

현장 관입 실험은 프로브 관입에 따라 주변 지반을 의도적으로 파괴시켜 지반특성을 파악할 수 있다. 본 논문의 목적은 현장 점토지반에 서로 다른 크기의 프로브 관입으로 인한 간극 수압 소산 특성을 이용하여 파괴에 따른 교란 효과를 분석하는 것이다. 현장 실험을 수행하기 위해 콘관입 시험(CPT), 달라토미터 시험(DMT) 그리고 현장 속도 프로브 장비(FVP: Field Velocity Probe)가 사용되었다. 샌드 매트(sand mat), PBD 그리고 사석을 이용한 지반 개량 중인 부산 북컨테이너 현장에서 실험이 진행 되었으며, 샌드 매트(sand mat)공법 이후 실내 실험을 수행하기 위해 시료가 채취 되었다. 실내에서는 물성치 실험 및 압밀 실험을 수행하여 지반 특성과 수평압밀계수 값을 도출하였다. 현장 실험은 지반 개량 후 압밀도 90% 시점에서 사석 제거 후 케이싱을 통해 CPT, DMT 그리고 FVP 순서대로 실험이 수행 되었다. 관입에 따른 영향 범위를 최소화 시키기 위해 각각의 실험은 3m 간격을 유지 하였으며, 매 심도 24m에서 관입을 멈추고 시간에 따른 간극 수압 변화 양상을 측정하였다. 실내 압밀 실험을 통해 수평 압밀 계수(C_h)를 산정하였으며, 현장 실험을 통해 각 프로브에 따른 t_{50} 값을 계산 하였다. t_{50} 값을 이용하여 산정된 등가 유효 반경은 FVP가 가장 작게 그리고 DMT가 가장 크게 산정되었다.

핵심용어 : 압밀, CPT, DMT, 유효 반경, 현장 속도 프로브, 간극수압 소산

1. 서 론

최근 해안가 주변의 건설 공사가 증가됨에 따라 대부분 점토 및 실트 성분으로 구성되어 있는 연약지반에 많은 시공이 이루어지고 있다. 연약지반은 상재 하중에 따라 큰 압밀 침하를 발생 시킬 수 있는 상태로서 정확한 현장 데이터를 획득하기 위해 각 조건에 맞는 보강공법이 고려 되어야 한다. 또한 신뢰성 있는 데이터를 획득 하기 위해서 실내

및 현장 실험이 수행된다. 그러나 각 실험 방법들에 따라 고유의 장 · 단점이 있으므로 여러가지 실험법들을 병행하여 토질 상수를 산정하고 있다. 현장 실험의 경우 지반의 교란을 최소화 시킬 수 있다는 장점이 있어 다양한 원위치 시험이 개발되어 현장에 적용되고 있다. 대부분의 현장 실험은 실험 목적에 맞는 다양한 크기의 프로브를 이용하여 관입에 따른 대상 지반의 특성을 파악 하고 있다. 그러나 프로브의 크기, 대상 지반의 상태 그리고 관입속도등에 따라 정도의

*고려대학교 건축 · 사회환경공학과 박사과정

**정회원 · 고려대학교 건축 · 사회환경공학과 박사과정

***정회원 · 고려대학교 건축 · 사회환경공학과 부교수 (E-mail : woojin@korea.ac.kr)

****정회원 · 교신저자 · 고려대학교 건축 · 사회환경공학과 부교수 (E-mail : jongsub@korea.ac.kr)

차이는 있지만 지반의 교란을 발생시킨다(Whittle and Aubeny, 1993; 이장덕과 구자갑, 2003; Li et al., 2005). 따라서 프로브 크기외의 조건이 동일 하다면 관입에 따른 교란 효과는 프로브 크기에 따라 영향을 받게 된다.

프로브 관입에 따른 현장실험은 의도적인 파괴에 의한 교란을 불가피 하게 야기시키며 교란에 따라 과잉간극수압의 생성 및 소산이 발생한다. 과잉 간극수압은 유효응력 및 전응력에도 영향을 미친다. 이와 같은 현상은 현재 프로브 관입에 따라 생성 및 소산되는 간극수압 데이터를 이용하여 분석되어 지고 있다(Lune et al., 1986; Sully et al., 1988). 현장 관입 장비인 콘 관입 실험(CPT)의 경우 교란 영역을 프로브 관입 시 프로브 주위에 발생하는 전단 영역과 소성 영역으로 구분하고 있다. 전단 영역은 지반의 전단 변형이 발생하여 나타나는 것으로 한계 상태를 넘은 교란 발생 영역이며, 소성 상태는 관입에 따라 압밀이 발생하는 영역을 의미한다(Kim et al., 2007). 따라서 전단 영역과 소성 영역의 구분을 위해 현재 많은 수치 해석 및 실험들이 수행되고 있으며 이를 통해 관입에 따른 등가 반경 및 경계 조건의 해석을 통해 교란영역을 평가하고 있다(Chapman, 1974; Harman, 1976; Parkin et al., 1980). 델라토 미터(DMT) 실험의 경우도 소산 실험의 여러 분석 방법 및 수치 해석을 통해 등가 반경을 산출 하여 관입에 따른 영역을 분석하고 있다(Robertson et al., 1988; Marchetti and Totani, 1989).

본 논문은 연약지반으로 구성되어 있는 부산 신항 현장에서 여러가지 형상의 관입장비의 관입에 따른 간극수압 소산 특성을 이용하여 교란 영역 분석을 시도 하였다. 현장 실험은 콘 관입 실험(CPT), 델라토 미터 실험(DMT) 그리고 최초 개발되어 현장 적용성 및 교란도 평가를 마친 현장 속도 프로브 실험(FVP)을 포함한다. 각각의 관입장비에 대해 간략하게 서술 한 후, 실험 방법을 설명하였으며 마지막으로, 프로브 크기와 간극수압 소산 관계를 이용하여 관입에 따른 등가 유효 반경과 교란 효과를 평가하였다.

2. 현장 실험 장비

2.1 콘 관입 실험(CPT)

콘 관입 실험(CPT)은 1934년 네덜란드에서 처음 소개되어 지반의 지지력 산정에 주로 이용되었으며 이후, 마찰력 및 간극수압 측정을 가능하게 하여 다양한 지반 정수를 획득하도록 개발되었다(Lunne et al., 1997). 이는 정밀도의 우수성, 연약지반의 예민성, 프로브의 추가 실험 장비 부착 등의 장점에 따른 결과 값의 높은 신뢰성으로 지반 정수 측정 목적을 위해 현장에서 널리 사용되고 있다.

일반적으로 사용되는 표준 콘(Standard Cone)의 제원은 선단각도 60°, 직경 35.7mm 원추 단면적 10cm² 그리고 주면 단면적은 150cm² 이다. 선단에서 저항 하는 원추 관입 저항력(q_c), 마찰 슬래브에서 측정되는 마찰 저항력(f_c) 그리고 간극수압을 측정할 수 있다. 간극 수압은 측정 위치에 따라 콘의 구분이 가능하며, 그림 1과 같이 서로 다른 3개 부분인 원추 선단(u_1), 원추 후면(u_2) 그리고 주면 마찰부(u_3)에서 측정이 가능하다. 하지만, 다공질 필터가 원추 선단

이나 주면 마찰부에 있을 경우 관입시 필터 손상 및 자체 압축 현상이 발생 하므로 원추 후면(u_2)의 간극 수압 값이 추천되고 있다.

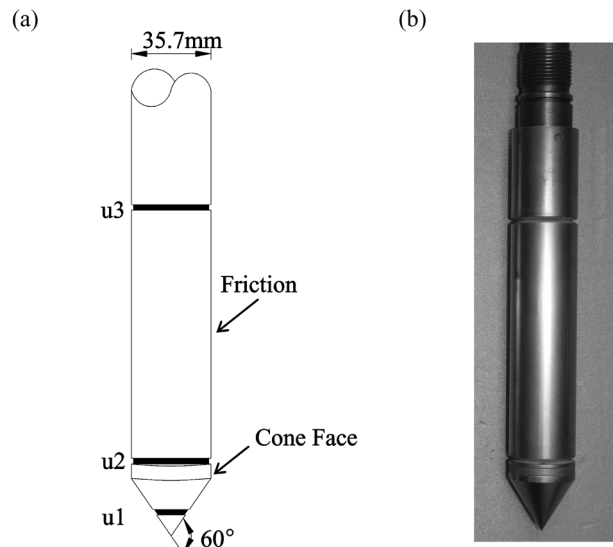


그림 1. 콘 관입 장비(CPT): (a) 모식도; (b) 사진

2.2 델라토 미터(DMT) 실험

델라토 미터 실험(DMT)은 1974년 Marcetti에 의해 고안 되어 현재까지 지속적으로 개발되어 콘 관입 시험과 마찬가지로 현장에서 널리 사용되고 있는 장비이다(Marchetti 2006). 전체적인 모식도는 그림 2와 같으며, 두께가 14mm, 길이가 220mm 그리고 폭이 95mm이다(Clayton et al., 1982; Marchetti, 2001).

신호음에 따라 측정된 A, B 그리고 C 값을 이용하여 P_0 , P_1 , 그리고 P_2 값이 산출되며, 최종적으로 재료지수(I_D), 수평 응력지수(K_D), DMT 계수(E_D) 그리고 간극수압지수(U_D)로 산정된다. 이들을 이용하여 경험적 상관관계를 통해 흙의 종류, 상대밀도, 과압밀비, 정지토압계수 등의 지반공학적 성질을 평가한다. P_2 값은 수압에 따른 영향을 도출하기 위해 많이 사용되어 왔다(Lutenegger and Kabir, 1988). 이는 CPT 실험과 동일한 소산 실험을 통해 압밀 계수 추정 가능성이 있음을 보여준다. 그러나 DMT 실험의 경우 장비의 형태가 CPT 와 같이 원뿔형으로 이루어지지 않아 유효 반경 산정에 어려운 문제가 있어 관측된 A 및 C 값을 이용하는 DMT-A, DMT-C 방법을 통해 분석되고 있다(Schmertmann 1988).

2.3 현장 속도 프로브(FVP) 실험

미소변형률 상태의 최대 전단탄성계수(G_{max}) 값을 정확히 도출 하기 위해 전단파 속도는 상당히 중요하다. 실내 실험의 경우 시료 채취 및 실내로의 이동시 발생하는 교란으로 인하여 정확한 전단파 속도를 도출 하기가 상당히 어렵다. 한편 현장 실험은 역산 과정등의 복잡한 해석등을 요구하는 경우가 많다. 이와 같은 단점을 보완하고 미소 변형률 상태의 효율적인 전단파 속도를 도출 하기 위해 현장 속도 프로브 장비(Field Velocity Probe: FVP)가 개발되어 현장 전단파 속도 산정에 활용되고 있다(이중섭 등, 2006).

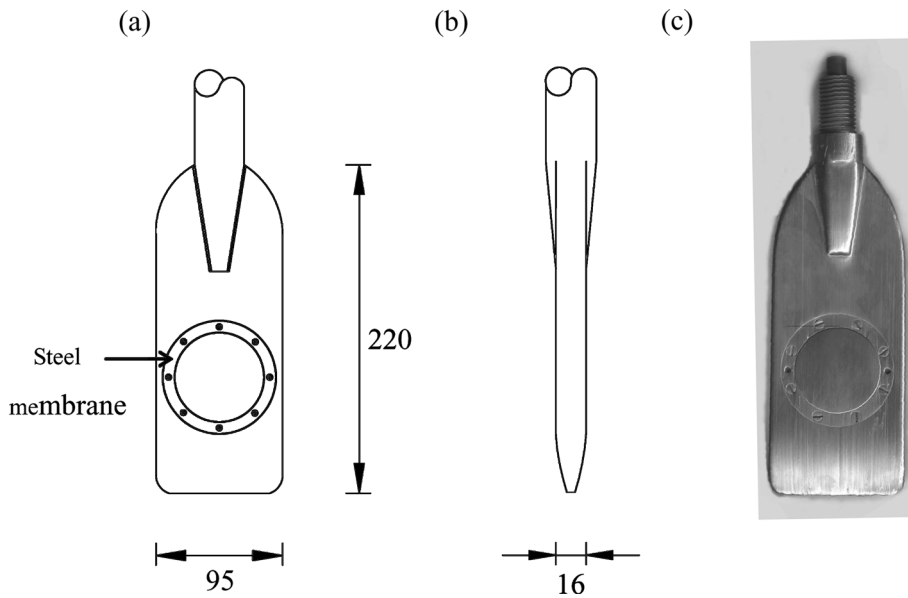


그림 2. 딜라토 미터 실험(DMT): (a) 정면도; (b) 측면도; (c) 사진. 그림 속의 단위는 mm임

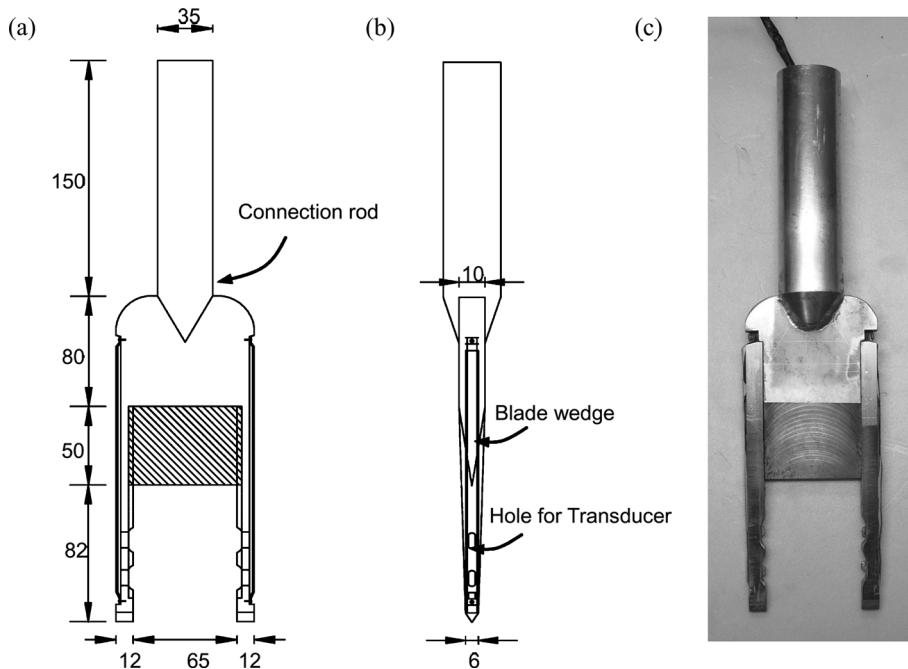


그림 3. 현장 속도 프로브(FVP) 장비: (a) 정면도; (b) 측면도; (c) 사진. 그림 속의 단위는 mm임

개발된 장비는 실내 캘리브레이션 및 많은 현장 실험을 통해 관입에 따른 교란을 최소화 시킬수 있도록 초기 모델인 링 타입(ring-type) FVP 에서 블레이드 타입(blade-type) FVP로 개선 되었다(윤형구 등, 2007). FVP 실험은 원하는 심도에서 측정이 가능하며 고해상도의 수직 분해능(예: 매 10cm 간격으로 전단파 속도 산정 가능)을 통한 현장의 정확한 전단파 속도 추상도를 얻을 수 있다. 분석 방법 또한 어떠한 역산 과정 없이 트랜스듀서 간의 거리와 초동 도달 시간을 이용하여 산정할 수 있다는 장점이 있다. 추후 현장의 전단파 측정 장비로서 많은 사용이 기대 되며, 최종 모델인 블레이드 타입 FVP의 제원은 그림 3과 같이 길이가 212mm, 너비가 90mm, 그리고 프레임 선단부의 두께는 6mm 이다.

FVP는 관입에 따라 전단파를 측정하는 현장 지반 조사

장비로서, 타 관입 장비와 마찬가지로 과잉 간극 수압을 발생 시킨다. 발생한 수압은 전응력, 유효응력, 그리고 유효응력의 함수인 전단파 속도에 영향을 미쳐 CPT와 DMT 처럼 대상 심도에서 수평 압밀 계수 도출이 가능 할 것으로 기대된다. 그러나 FVP를 이용한 수평 압밀 계수 도출은 처음 시도 되는 것으로 제안된 식을 사용하기 위해서는 FVP 장비의 관입 영역을 원으로 환산 하는 등가 유효 반경을 우선 고려해야 한다. 본 연구에서는 동일 심도에서 CPT에 의해 측정된 데이터를 이용하여 FVP 의 등가 유효 반경을 산정하였으며 CPT 및 DMT 등가유효반경과 비교하였다.

3. 소산 이론을 이용한 등가 유효 반경 산정

현장 관입 실험에 의해 측정된 소산 데이터는 수평 압밀

계수를 도출 할 수 있으며, 다양한 연구를 통해 다음과 같은 이론들이 제안되고 있다(백승훈, 2002). 본 논문에서는 이러한 이론을 바탕으로 CPT, DMT, FVP의 등가반경을 산정하고자 한다. 현장 관입시험의 소산에 관하여 다양한 연구를 통해 다음과 같은 이론들이 제안되고 있다.

3.1 Torstensson (1977) 에 의한 방법

지반의 초기 응력 상태를 이상적인 탄·소성의 일차원으로 고려하고 구형 혹은 원통형 공동팽창이론에 의해 초기 과잉간극수압을 추정 하는 방법이다. 관측 소산곡선과 예측 소산 곡선이 만나는 시점을 50%로 가정하여 다음과 같은 수평 압밀 계수 식을 제안 하였다(지반공학회, 2003).

$$C_h = \frac{T_{50} \cdot R^2}{t_{50}} \quad (1)$$

여기서, t_{50} 은 과잉 간극수압의 초기 상태와 평형 상태의 값을 이용하여 계산된 50% 소산 시간, T_{50} 은 이론시간계수 그리고 R 은 관입장비의 등가 유효 반경이다.

3.2 Baligh and Levadoux (1980) 에 의한 방법

변형률 경로법(strain path method)을 통해 선형·비혼합, 비선형·혼합의 압밀 이론에 따른 간극수압 소산을 추정하여 다음과 같은 이론 시간계수를 제안하였다.

$$T = \frac{C_h \cdot t}{R^2} \quad (2)$$

여기서, t 는 특정 압밀도까지의 간극수압 소산시간, T 는 시간 t 에 대한 시간계수, R 은 관입장비의 반경 그리고 C_h 는 수평 압밀 계수이다.

3.3 Gupta(1983)에 의한 방법

관측되고 계산된 두개의 간극수압 소산 곡선이 50%가 되도록 반복계산을 통해 압밀계수 계산법을 제안 하였다. 부분 배수 상태를 고려하였기 때문에 실트나 모래질 점토 특성을 유사하게 모사할 수 있는 것으로 알려져 있다(Kabir and Lutenegeger, 1990).

3.4 Teh and Houlsby(1988, 1991)에 의한 방법

변형률 경로법을 이용하고 강성지수($I_R = G/S_u$)를 고려하여 다음과 같은 이론 시간 계수 관계식이 제안 되었다.

$$T^* = \frac{C_h \cdot t}{R^2 \sqrt{I_R}} \quad (3)$$

여기서 t 는 특정 압밀도까지의 간극수압 소산시간, I_R 은 강성지수, R 은 관입장비의 반경 그리고 C_h 는 수평 압밀 계수이다.

본 연구에서는 다양하게 제안된 방법들 중 원추 후면에서 측정된 간극수압 값(u_2)을 통해 대상지반의 특성을 효율적으로 반영할 수 있고, 실제 국내 지반 조건에 적합한 Torstensson 방법을 사용하였다(Lee and Kim, 1998).

3.5 t_{50} 예측 방법

t_{50} 은 50% 압밀에 소요되는 시간으로서 초기 발생된 과잉 간극 수압 값과 과잉 간극 수압이 완전히 발생한 이후 즉, 평형 간극수압 값을 이용하여 결정한다. 그러나 평형 상태 도달에는 상당히 많은 시간이 요구 되므로 평형 상태 과잉 간극수압의 측정 없이 t_{50} 을 예측하는 방법들이 많이 제안 되었다. 최종 값 예측을 위해 이용되는 방법에는 쌍곡선 법(Hyperbolic method), 호시노법(Hoshino method) 그리고 아사오카법(Asaoka method)이 있으며, 정규화된 과잉간극 수압과 이론적인 시간 계수를 이용하여 추정하는 반복 법(iteration method) 등의 방법이 있다(황대진과 김철웅, 1997; Kim and Lee, 2000). 본 연구에서는 실제 간극수압 수렴값과 유사한 결과를 도출하여 효과적인 분석을 수행하기 위한 쌍곡선 법을 사용하였다.

쌍곡선법은 간극수압이 쌍곡선을 따라 감소한다는 가정하에 실측 데이터로부터 최종 데이터를 예측 하는 방법이다. 식 (4)와 같은 쌍곡선 기본식을 이용하며, 시간에 따른 간극 수압 그래프의 추세선을 통해 기울기 b 값과 y 축과의 교차점인 a 를 결정한다. 평형상태의 간극수압은 식 (5)와 같이 표현된다. 또한 식 (4)로부터 t_{50} 은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$U_t = U_i + \frac{t}{\alpha + \beta t} \quad (4)$$

$$U_\infty = U_i + \frac{1}{\beta} \quad (5)$$

$$t = \frac{(U_t - U_i)\alpha}{1 - \beta(U_t - U_i)} \quad (6)$$

여기서, U_t 는 시간 t 일때의 간극수압, U_i 는 초기 간극수압, U_∞ 는 최종 간극 수압 그리고 a , b 는 실험에 의해 결정되는 계수이다.

4. 지반 조건

4.1 시공 절차

현장 실험은 부산 신항 북컨테이너 현장에서 수행 되었다. 원지반은 상부에 두께 25m 이상 연약점토 및 그 하부에는 견고한 점토로 구성되어 있다. 본 현장에서는 연약 점토의 개량을 위해 샌드매트(sandmat)와 PBD(Plastic Board Drain)를 타설한 후 사석을 이용한 상재하중 재하에 의한 연약지반 개량 공법을 적용하고 있다. 그림 4는 대상지반의 시공 및 실험 순서에 따른 과정을 보여주고 있다. 관입에 의한 교란 및 등가반경을 위한 실험 장비의 관입 깊이는 24m(사석 상부 기준)로서 동일하며 실험 구간은 관입에 따른 영향 범위를 최소화시키기 위해 수평 거리로 각각 3m 간격을 유지 하였다.

4.2 기본 물성 실험

연약지반으로 구성되어 있는 대상 지반은 지반 개량을 위해 샌드 매트(sand mat) 공법이 적용 되었다. 실내 실험을 수행하기 위해 샌드 매트의 모래 층을 제외한 점토 층에서 피스톤 샘플러(Piston sampler)를 이용하여 시료를 채취 하였다. 시료 채취는 매심도 1m 간격으로 8m에서 40m까지

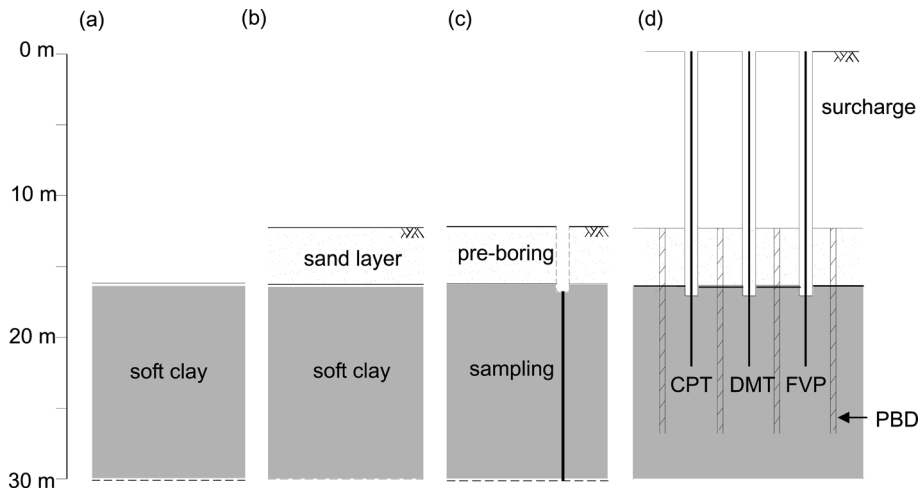


그림 4. 지반 개량 및 현장 실험 과정: (a) 원지반; (b) 샌드 매트(Sand Mat) 포설; (c) 시료 채취; (d) 사석을 이용한 상재 하중재하 후 관입실험

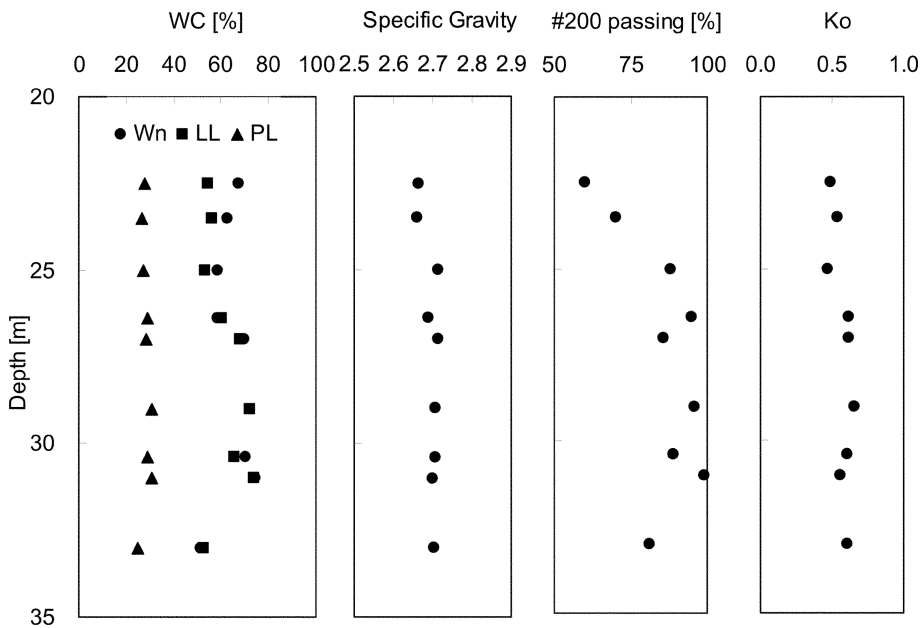


그림 5. 관입 깊이에 따른 물성치(Wn: 자연함수비, LL: 액성한계, PL: 소성한계)

33개의 시료를 채취 하였다. 채취한 시료를 이용하여 기본 물성치 실험이 수행되었으며, 그 결과는 그림 5와 같다. 실내 물성치 실험을 통해 대상 지반의 함수비는 약 30%~75% 범위로 산정 되었으며, 소성지수는 16%~43% 범위로 나타났다. 비중 값은 2.65~2.7 범위 값을 보였으며, K_0 값도 0.5~1.0 사이 값으로 나타났다. 체 분석 결과 매 층의 200번 체 통과율이 85% 이상이며, USCS 분류법에 따라 현장 25m 심도까지의 연약점토 상태는 CH, 그 이후의 견고한 점토는 CL로 구분 되었다.

4.3 실내 압밀 시험

채취한 시료를 이용하여 대상 지반의 압밀 특성 평가를 위한 일정변형률 압밀시험(CRS)을 수행하였다. 소산 시험이 진행된 심도와 동일 심도의 시료를 이용하여 압밀 실험을 수행하여 그림 6과 같은 결과를 얻었다. 이를 이용한 수평 방향 압밀계수(C_h)와 압축지수(C_c)는 과압밀 상태에서 $C_h=0.018\text{cm}^2/\text{sec}$, $C_c=0.52$ 그리고 정규압밀 상태에서 $C_h=0.00275\text{cm}^2/\text{sec}$, $C_c=1.09$ 로 산정 되었다. 또한 산정된 선형

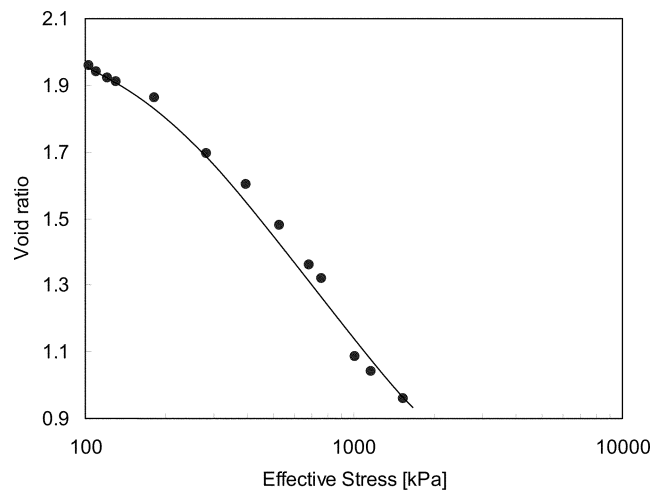


그림 6. 실내 일정 변형률 압밀 시험(CRS) 결과

압밀 하중을 고려한 과압밀비(OCR)가 깊이에 따라 약 1 정도로 산정되어 대상지반은 시료채취시 정규압밀 지반 상태를 보여준다.

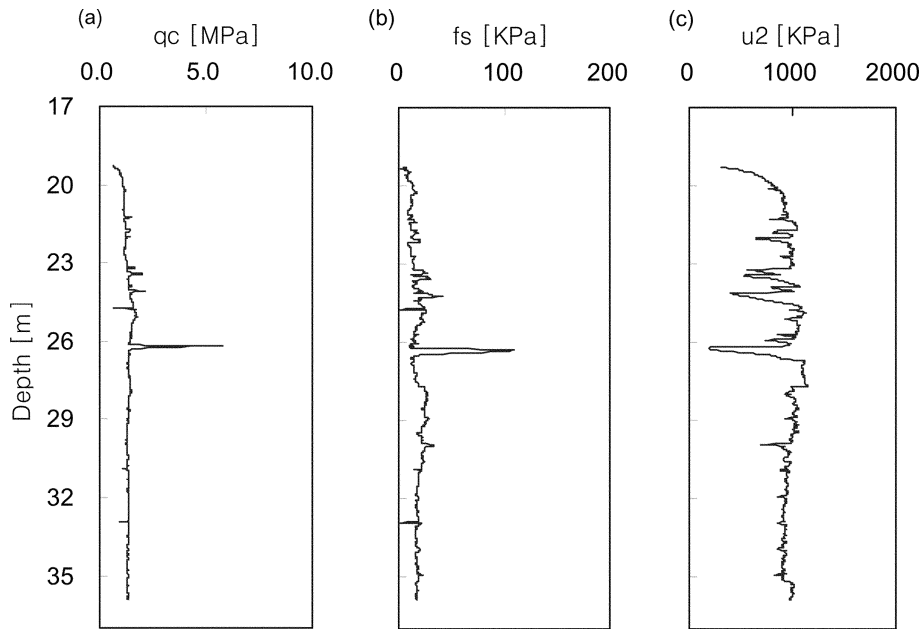


그림 7. CPT 측정 결과:(a) 선단 저항값(q_c); (b) 마찰 저항값(f_s); (c) 간극 수압값(u_2). 깊이는 사석 상부 기준임

5. 현장 실험

5.1 콘 관입 실험(CPT)

정확한 간극 수압의 측정을 위해 글리세린을 이용하여 포화시킨 콘을 사용해 2cm/sec의 관입 속도로 관입하였다. 관입에 따라 매심도별 선단 저항(q_c), 마찰 저항(f_s) 그리고 간극수압(u_2)을 측정하였으며 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 선단저항, 마찰저항 결과 값이 모두 비슷한 경향을 나타내며, 관입깊이 26m 정도에서 협재층이 존재하는 것을 확인하였다. 소산 실험을 진행하기 위해 관입 깊이 24m에서 관입을 멈추고 시간에 따른 간극수압 변화양상을 측정하였으며, 그 결과는 그림 8에 나타내었다. 소산 실험 결과의 경우 비록 100% 소산된 간극 수압 값을 얻지 못했지만, 앞서 언급한 쌍곡선법을 통해 평형 간극 수압 및 50% 소산 시간을 예측할 수 있도록 63분까지 실험을 수행하였다. 쌍곡선법은

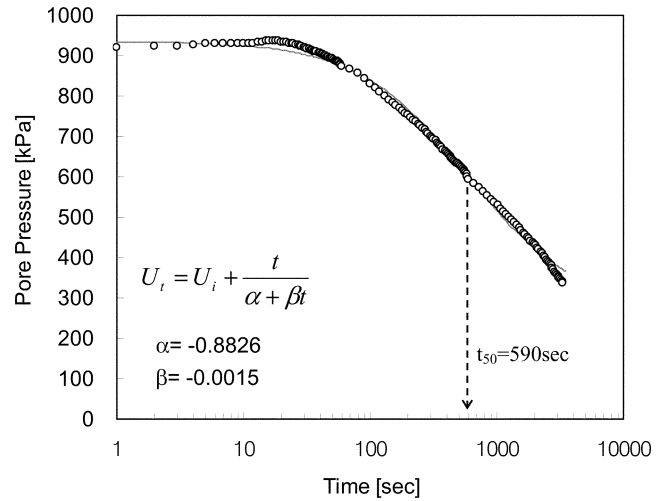


그림 8. CPT 관입 후 시간경과에 따른 u_2 변화

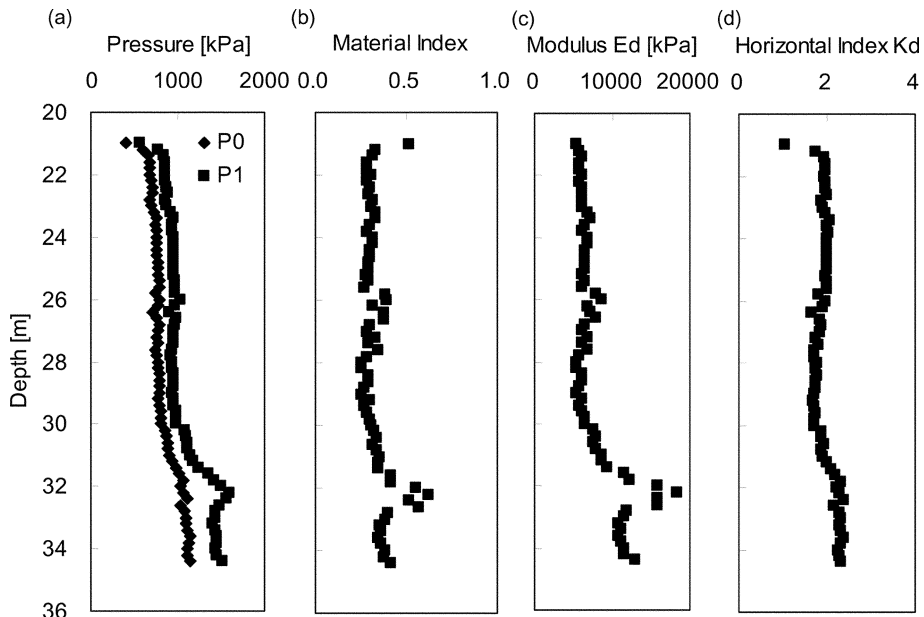


그림 9. DMT 실험 결과:(a) 접촉 응력(P_0) 및 팽창 응력(P_1); (b) 재료지수(I_b); (c) DMT 탄성계수(E_D); (d) 수평압력지수(K_D)

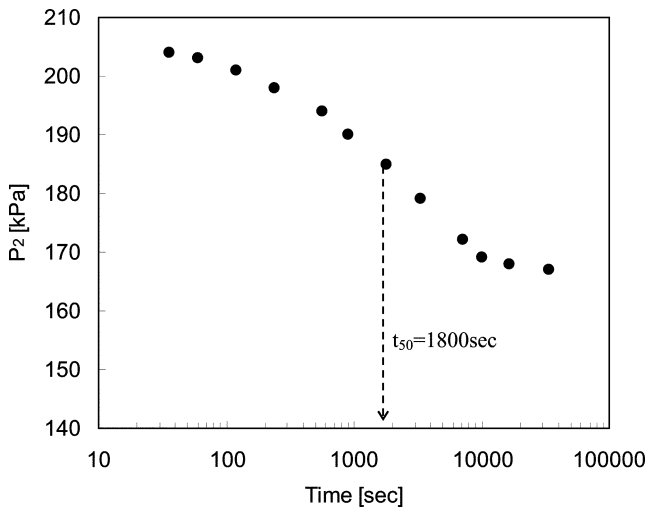


그림 10. DMT 관입 후 시간경과에 따른 P₂ 변화

적용하여 a계수는 -0.8826, b값은 -0.0015 그리고 결정계수 (R²)은 0.99로 산정되었다. 초기 간극 수압 값(U_i=936kPa)과 계산된 최종 간극 수압 값(U_∞=269kPa)을 이용하여 50% 소산 시점의 간극 수압 값(U₅₀=602kPa)을 계산하였다. 그리고 쌍곡선 법을 이용하여 U₅₀에 해당하는 t₅₀는 약 590초로 산정하였다.

5.2 딜라토 미터 실험(DMT)

DMT 블레이드 관입전 캘리브레이션을 수행하였으며, 로드(rod)에 연결하여 관입을 하였다. 매심도 A, B 값 측정에 따라 대상지반의 상태를 분석 하여 그 결과는 그림 9에 나타내었다. CPT 실험과 동일하게 심도 24m에서 관입을 멈추고 소산실험을 수행하였으며 소산 실험시 시간 경과에 따른 압력 P₂의 변화를 그림 10에 나타내었다. P₂ 값은 그림 10과 같이 초기 204kPa였으며, 시간이 경과함에 최종적으로 166kPa에 수렴함을 알 수 있다. 따라서 50% 소산에 따른 P₂ 값을 185kPa 계산하였으며, t₅₀에 해당 되는 시점은 약 1800초로 산정하였다.

5.3 현장 속도 프로브(FVP) 실험

FVP 장비도 CPT 및 DMT와 마찬가지로 로드(rod)에 연결하여 관입하였다. 고해상도 수직 분해능의 전단파 속도를 측정하기 위해 매 10cm 간격으로 전단파를 측정하여, 그림 11에 전단파 주상도를 나타내었다. 근접장 효과(Lee and Santamarina 2005)를 고려하여 초동 시간을 산정하였으며, 벤더 엘리먼트 끝단 거리를 이용하여 그림 12와 같이 대상지반의 전단파 속도를 산정 하였다. 소산 실험은 CPT 및 DMT의 소산실험과 동일한 깊이인 24m에서 관입을 멈추고 시간에 따른 전단파 신호를 측정하여 그림 13에 나타내었다. 그림 13을 이용하여 FVP 관입 후 시간에 따른 전단파 속도를 산정하여 그림 14에 나타내었다. 전단파 속도는 초기 속도 144m/s에서 경과시간 60분 도달 후 160m/s로 거의 수렴한 것으로 나타나 간극수압이 평형상태에 도달 하였음을 알 수 있다. 따라서 50% 소산에 따른 전단파 속도는 152m/s로 계산되었으며, FVP를 통해 산정된 t₅₀은 약 300초로 얻어졌다.

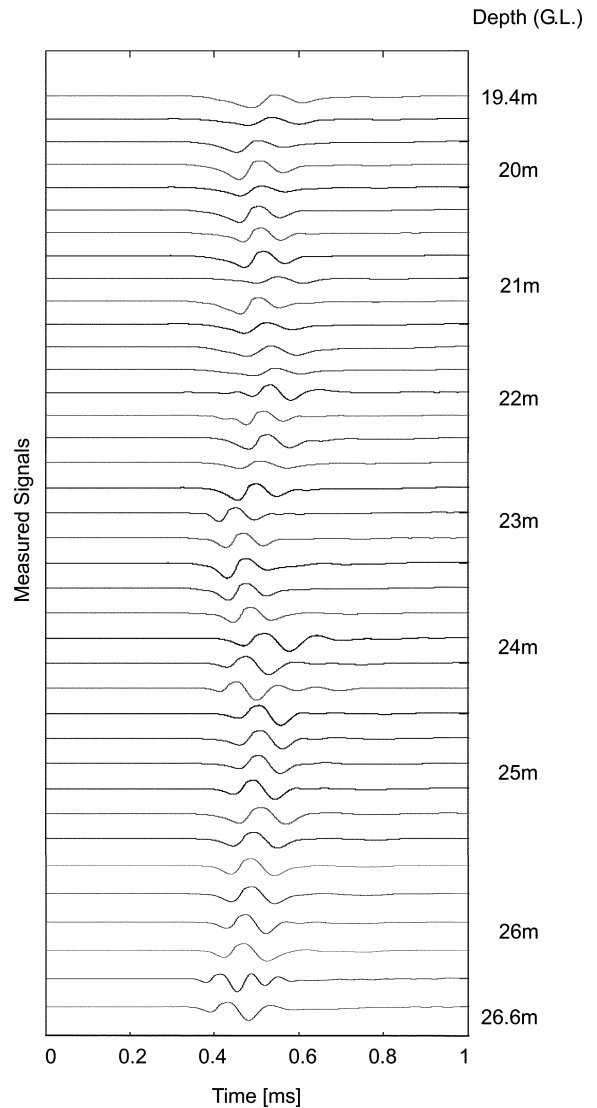


그림 11. FVP를 이용하여 측정된 대상지반 전단파 신호

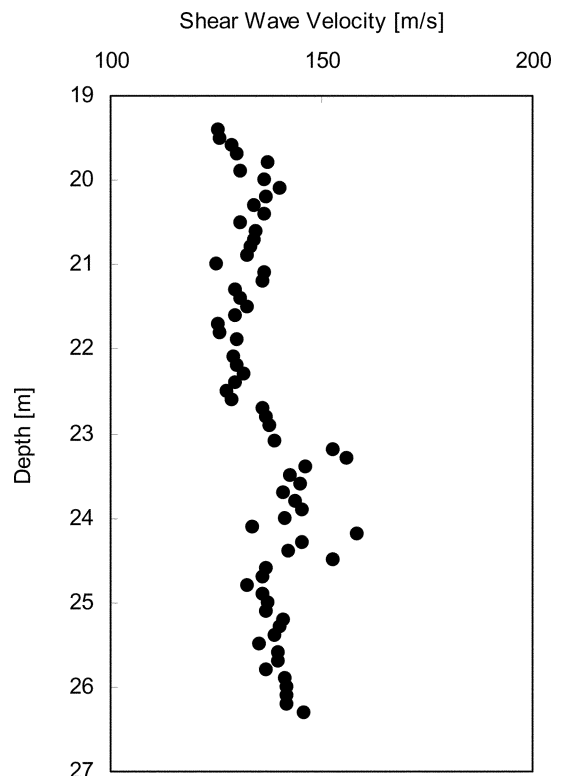


그림 12. FVP를 이용하여 산정된 대상 지반의 전단파 속도

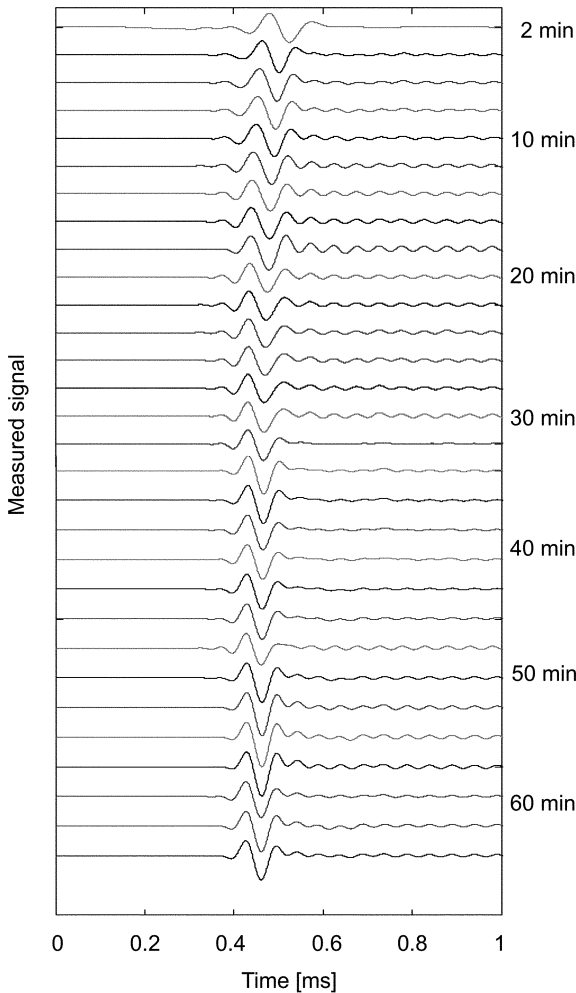


그림 13. 소산 실험시 시간경과에 따른 전단파 신호 변화

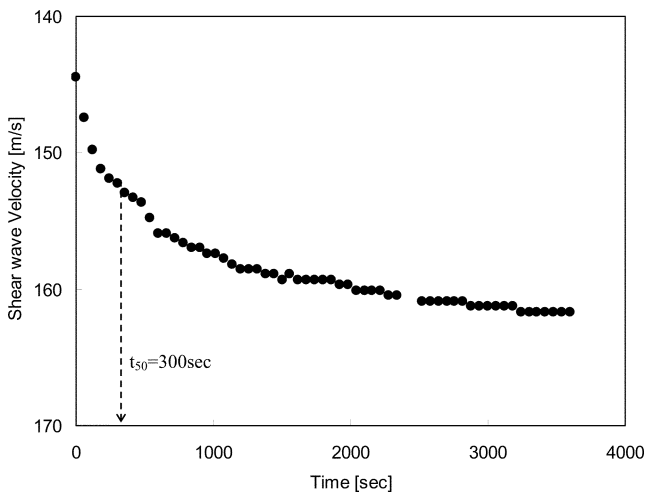


그림 14. FVP 관입 후 시간 경과에 따른 전단파 속도 변화

5.4 등가 반경 비교

등가유효반경은 장비의 관입으로 인해 발생하는 공동의 원형으로 환산하였을 때의 반경으로, 이것을 통해 관입장비가 얼마나 큰 의도적 파괴 영역을 갖는지 알 수 있다. 일반적인 현장장비 소산이론에 따르면, 등가유효반경이 클수록 관입으로 인해 발생된 간극수압의 소산시간이 길어지게 된다. 본 연구에서는 지반조건과 관입속도를 동일 상태로 유지한 후 형상 및 크기가 다른 CPT, DMT 그리고 FVP를 관입하면서 관입에 따른 의도적 파괴에 의한 교란효과를 등가 유효

반경을 산정하여 비교를 시도하였다. 동일 지반 상태에서 실험을 진행하여 측정된 데이터를 통해 CPT, DMT 그리고 FVP 순서대로 t_{50} 값을 590초, 1800초 그리고 300초로 산정되었다. Torstensson이 제안한 식 (1)을 이용하여 식 (7)과 같이 대상지반 특성을 반영하는 수평 압밀계수(C_h) 및 시간 계수(T_{50}) 값의 동일함을 통해 관입 장비의 등가 유효 반경을 계산하였다.

$$\frac{C_h}{T_{50}} = \frac{R_{(CPT)}^2}{t_{50(CPT)}} = \frac{R_{(DMT)}^2}{t_{50(DMT)}} = \frac{R_{(FVP)}^2}{t_{50(FVP)}} \quad (7)$$

이미 알고 있는 콘의 등가 유효 반경(=17.8mm)과 t_{50} 값을 (=590초) 이용하여 DMT(t_{50} =1800)와 FVP(t_{50} =300)의 등가 유효 반경을 각각 30.8mm, 12.6mm로 산정하였으며, 그 결과는 표 1에 나타내었다. 그림 15에는 CPT, DMT 그리고 FVP의 순면적과 등가 면적을 나타내어 효율적으로 비교하였다.

관입되는 프로브의 면적이 작을수록 교란 영역이 작으므로 DMT, CPT 그리고 FVP 순서대로 교란효과가 작다는 것을 알 수 있다. 이번 실험 결과는 일반적으로 알려져 있는 DMT가 CPT 보다 큰 교란 효과를 나타낸다는 것과 일치하는 결과이며, 처음 시도된 FVP의 영역이 CPT 보다 작게 평가 되었다. 이와 같은 결과는 FVP의 경우 교란 영역이 DMT와 같이 블레이드 전 범위가 아닌 두개의 프레임으로 국한됨을 의미한다. 즉 FVP의 경우 대상 지반의 교란도가 상당히 작기 때문에 비교란 원지반 전단파 속도 산정에 유리함을 알 수 있다.

본 논문에서 수행한 연구는 등가 유효 반경에 따른 교란 효과만을 추정하였기 때문에 보다 정확한 교란 효과를 추정

표 1. 등가 유효 반경 및 면적

Instrument	CPT	DMT	FVP
Projected area [cm ²]	10	15.2	1.92
t_{50} [sec]	590	1800	300
Equivalent radius [mm]	17.8	30.8	12.6
Equivalent area [cm ²]	9.95	29.78	4.98

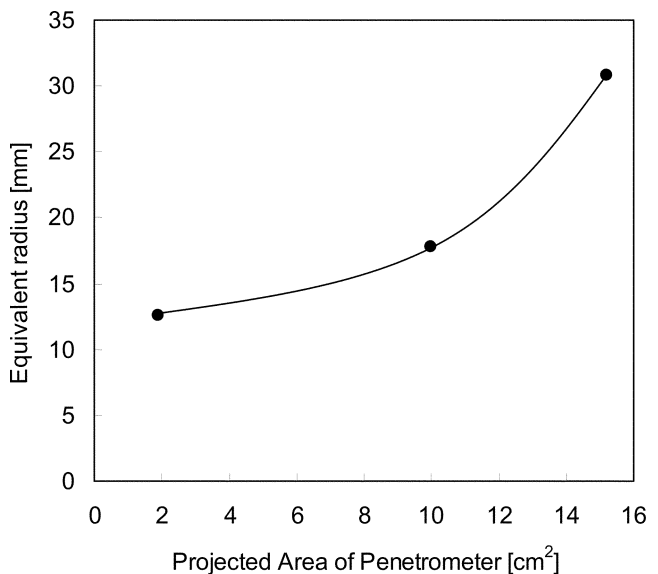


그림 15. 관입 장비의 순단면적과 등가 반경 비교

하기 위해서는 교란 영역까지 평가 되어야 한다. 추후 수치해석을 통해 프로브 크기 및 형상에 따라 교란이 발생하는 영역에 대한 연구가 수행될 예정이며, 다양한 현장 지반 조건을 이용하여 지반 조건에 의한 영향도 연구를 수행할 예정이다.

6. 요약 및 결론

CPT, DMT 그리고 FVP를 지반공사가 진행중인 부산 신항 북컨테이너 현장에서 동일심도 24m까지 관입한 후 관입에 의해 발생된 과잉간극수압의 소산을 측정하여 등가반경을 산정하였다. 각 관입장비는 수평 방향으로 약 3m 간격을 유지하였다. t_{50} 을 예측하기 위해 CPT 실험은 쌍곡선 법이 사용되었으며, DMT 및 FVP는 각각의 측정된 초기 값과 평형 상태에 도달한 간극수압 값을 이용하여 50% 간극수압 소산 시점을 계산하였다. 기 산정된 CPT의 등가 유효반경을 이용하여 국내 지반 조건에 적합한 Torstensson 방법을 통해 등가 유효 반경을 도출 하였다. 유효 반경은 CPT=17.8mm, DMT=30.8mm 그리고 FVP=12.6mm로 산정되었다. 등가 유효 반경은 단면적 증가시 커짐을 알 수 있으며 그 경향이 선형이 아니라, 쌍곡선 관계임을 알 수 있다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2005년도 지역특성화 연구개발사업(과제번호:B04-01)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

백승훈(2002) **현장실험에 의한 부산점토의 토질 특성 분석**, 박사학위논문, 동아대학교.

윤형구, 이창호, 엄용훈, 이종섭(2007) 연약지반 평가를 위한 블레이드 타입 현장 전단파 속도 프로브, **한국지반공학회는문집**, 한국지반공학회, 제23권 제12호, pp. 33-42.

이장덕, 구자갑(2003) 현장시험에 의한 Smear Zone의 평가, **한국지반공학회는문집**, 한국지반공학회, 제19권 제6호, pp. 207-216.

이종섭, 이창호, 윤형구, 이우진, 김형섭(2006) 관입형 현장 전단파 측정 장치의 개발 및 적용, **한국지반공학회는문집**, 한국지반공학회, 제22권 제12호, pp. 67-76.

한국지반공학회 지반공학 시리즈(2003) **지반조사결과의 해석 및 이용**, 구미서관.

황대진, 김철웅(1997) 피에조콘의 간극수압 소산시험에 관한 연구, **한국지반공학회는문집**, 한국지반공학회, 제13권 제6호, pp. 25-36.

Baligh, M.M. and Levadoux, J.N. (1980) *Pore pressure dissipation after cone penetration*, Report No. MITSG 80-13, MIT, Cambridge, Massachusetts, U.S.A.

Champman, G.A. (1974) A calibration chamber for field test equipment, Proc. 1st Eur. Symp. Penetration Testing, Stockholm 2.2, pp. 59-65.

Clayton, C.R.I., Matthews, M.C., and Simons, N.E. (1982) *Site Investigation*, Geotechnique. Info.

Gupta, R.C. (1983) Determination of the in situ coefficient of consolidation and permeability of submerged soil using electrical piezoprobe sounding, Ph. D., dissertation, Univ. of Florida.

Harman, D.E. (1976) *A statistical study of static cone bearing capacity, vertical effective stress and relative density of dry and*

saturated fine sands in a large triaxial testing chamber. MSc thesis, University of Florida.

Houlsby, G.T. and Teh, C.I. (1988) Analysis of the piezocone in clay, *Proceedings of the International Symposium on Penetration Testing*, ISOPT-1, Orlando, Vol. 2, pp. 777-783.

Kabir, M.G. and Lutenegeger, A.J. (1990) In situ estimation of the coefficient of consolidation in clays, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 27, pp. 58-67.

Kim, Y.S. and Lee, S.R. (2000) Prediction of long-term pore pressure dissipation behavior by short-term piezocone dissipation test, *Computers and Geotechnics*, 27, pp. 273-287.

Kim, T., Kim, N.K., Tumay, M.T., and Lee, W. (2007) Spatial distribution of excess pore-water pressure due to piezocone penetration in overconsolidated clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 6, pp. 674-683.

Lee, J.S. and Santamarina, J.C. (2005) Bender elements: performance and signal interpretation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 9, pp. 1063-1070.

Lee, S.J. and Kim, M.M. (1998) *Estimations of Geotechnical Properties from Piezocone Penetration Tests in Korea*, 1st International Conference on Site Characterization, Atlanta, pp. 1099-1104.

Li, Z., Kutter, B.L., Wilson, D.W., Sprott, K., Lee, J.S., and Santamarina, J.C. (2005) Needle probe application for high-resolution assessment of soil spatial variability in the centrifuge, *Geofrontiers*, GSP138, Austin, USA.

Lunne, T., Eidsmoen, T.E., Powell, J.J.M. and Quaternmann, R.S.T. (1986) Piezocone testing in overconsolidated Clays, *39th Canadian Geotechnical Conference*, Ottawa, pp. 209-218.

Lunne, T., Robertson, P. K. and Powell, J. J. M. (1997) *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*, Blackie Academic & Professional.

Lutenegeger, A.J. and Kabir, M.G. (1988) *Dilatometer C-reading to help determine stratigraphy*, 1-ISOPT, pp. 549-554.

Marchetti, S. and Totani, G. (1989) *C_h evaluations from DMTA dissipation curves*, XII ICSMFE, pp. 281-286.

Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G., and Calabrese, M. (2001) *The flat dilatometer test in soil investigations*, A report by the ISSMGE Committee TC 16. Proc. Inter. Conf. On In-situ Measurement of soil properties, Bali, pp. 1-41.

Marchetti, S. (2006) *Origin of the flat dilatometer*, Proc. 2nd Inter. Conf. On The Flat Dilatometer, Washington D. C, pp. 2-3.

Parkin, A., Holden, J., Aamot, K., Last, N., and Lunne, T. (1980) *Laboratory investigation of CPT's in sand*, Report 52108-9, Norwegian Geotechnical Institute.

Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D., and By, T. (1988) *Excess pore pressures and the flat dilatometer test*, 1-ISOPT, pp. 567-576.

Schmertmann, J.H. (1988) Guidelines for using the CPT, CPTu and Marchetti DMT for geotechnical design, Report No. FHWA-PA-87-024+84-24 to PennDOT, 3.

Sully, J.P., Campanella, R.G., and Robertson, P.K. (1988) Overconsolidation ratio of clays from penetration pore pressures, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 2, pp. 209-216.

Teh, C.I. and Houlsby, G.T. (1991) An analytical study of the cone penetration test in clay, *Geotechnique*, Vol. 1, No.41, pp. 17-34.

Torstensson, B.A. (1977) "The pore pressure probe". In Geotech. Meeting. Norwegian Geotech. Society, Vol. 34, pp. 1-15.

Whittle, A.J. and Aubeny, C.P. (1993) The effects of installation disturbance on interpretation of in situ tests in clay, *Predictive Soil Mechanics*, Thomas Telford, London, pp. 742-767.

(접수일: 2008.5.26/심사일: 2008.7.1/심사완료일: 2008.9.2)