

4. 준설·매립 연약점토의 전단특성

이 승, 양태선, 윤돈규, 한창연

준설패립 연약점토의 전단특성

이 송 (서울시립대학교 토목공학과 부교수)
양태선 (서울시립대학교 토목공학과 박사과정)
윤든규 (서울시립대학교 토목공학과 석사과정)
한창연 (서울시립대학교 토목공학과 석사과정)

목 차

1. 서론
2. 이론적 배경
 - 2.1 준설패립토의 전단특성
 - 2.2 일정변형률 압밀이론
 - 2.3 얇은 판 관입이론
3. 실험장치 및 방법
 - 3.1 시료의 선정
 - 3.2 실험장치
 - 3.3 실험방법
4. 실험결과의 고찰 및 분석
 - 4.1 얇은 판 관입시험결과의 고찰
 - 4.2 압밀시험 결과의 고찰
 - 4.3 실험결과의 비교 분석
5. 결론

참고문헌

1. 서 론

금세기에 들어서면서 국내외를 막론하고 국토의 효율적 활용차원에서 이용효율이 낮았던 해안을 매립하여 대규모의 용지를 확보, 이용하는 작업이 활발히 진행되고 있다. 이같은 대규모 토목공사에 있어서 매립재료의 선정은 매우 중요한 역할을 하게 된다. 매립재료의 공학적 성질을 고려할 때 인근 산토를 이용하는 것이 유리하지만 비용이나 물량면에서 효과가 크지 못하므로 해상 퇴적점토를 준설하여 매립에 이용하게 된다. ¹⁾³⁾¹³⁾

Hydraulic Pump 로 준설된 점토는 함수비가 대단히 높아 거의 유체와 같은 거동을 보이고 큰 변형을 동반하므로 종래의 토질역학적 관념으로는 해석이 어렵기 때문에 새로운 접근기법을 개발해야 한다. 이러한 준설점토에 대한 압밀 및 강도특성에 관한 연구는 최근 활발히 진행되고 있으나 아직까지 그 연구 정도는 초보단계를 벗어나지 못한 실정이므로 이러한 지반에 대한 전단강도와 압밀침하 문제를 설계에 반영하는데 많은 어려움을 겪게 된다.

지금까지의 강도시험법으로는 베인 시험기나 회전식 점도계를 이용한 방법이 가장 실질적인 강도를 구할 수 있는 것으로 알려져 있다. 회전점도계를 이용한 연구로는 INOUE, TAN & LEE, 鶴谷, 中野 & 鷹濱, TAN, YONG, LEONG & LEE 등 여러 연구자에 의해 적용 가능성이 이미 증명되었다. 또 베인 시험기를 이용하여 초연약점토의 강도를 측정하는 방법은 伊藤 등에 의해 가능성이 확인되었다. 그러나 INOUE, TAN & LEE 는 이 두가지 시험법에 문제가 있음을 시사하면서 강도를 직접 구하는 방법을 제안했다. 이들은 얇은 판을 이용하여 직접 관입시험을 실시하여 강도를 구하고 회전점도계 시험으로 구한 강도와 비교함으로써 그 가능성을 검토하였다. ⁵⁾¹²⁾⁸⁾¹⁶⁾

伊藤, 松井 & 阿倍 는 초연약 지반에 Bingham 소성체 모델을 적용하여 항복전단응력 및 소성점토를 구하고 종래의 강도정수인 점착력과 내부마찰각을 대신하여 이들을 새로운 지반정수로 이용하여 전단거동을 예측하는 것이 합리적이라고 제안하고, 함수비와 액성한계비(W/LL or W/F)가 2.0 근방에서 강도특성의 경계점이 존재함을 시사하였고 INOUE, TAN & LEE 는 이 점을 슬러리 한계(slurry limit)라 명명했다.

초연약 준설점토는 시간종속적 변형특성을 보이며 광범위한 연경도 상태에 따라 전단특성은 매우 상이한 거동을 보인다. 이런 다양한 전단특성을 계통적으로 취급하는 접근방법으로 역학모델을 들 수 있다. 본래 준설점토는 고함수비의 초연약점토로서 유체처럼 거동하고 전단응력은 변형속도에 의해 지배되고, 실용적인 면에서 볼 때 영변형율(zero strain rate)에서의 전단응력(=항복전단응력=전단강도)은 중요하며 또한 직접 구하기 어려운 정수이다. 따라서 준설점토의 유동특성을 아는 것은 대단히 중요하며 유동 모델(rheologic model)을 이용하여 강도를 추정하는 방법이 이용되어야 한다. ⁶⁾¹²⁾

TERZAGHI 의 일차원 압밀이론 및 표준압밀시험법을 초연약 점토에 적용하는데는 이론적, 실험적 한계가 있다. 이론적 한계로서는 층두께의 변화를 무시한 이론을 초연약 점토와 같이 큰 변위를 동반하는 재료에 적용한다는 것이며 실험적인 한계는 재하시 충격으로 시료의 누출현상(Squeezing)을 피할 수 없다. 층두께의 변화를 고려한 유한변형이론은 三笠 및 GIBSON, ENGLAND & HUSSEY 등의 이론이 있으며, 누출현

상 및 저응력 영역에 대해서는 대단히 적은 응력 혹은 변위를 연속재하하는 시험법을 이용함으로써 측정정도를 높일 수 있다.

이러한 시험법은 하중, 변위, 간극수압 중 하나를 제어하게 되는데 그 제어방식에 따라 일정하중을 압밀시험법, 일정변형을 압밀시험법, 일정동수구배 압밀시험법이 있으며 이들 시험법중 어느 것이 최적의 방법인가는 사용목적에 따라 다르지만 梅原 는 실험적 연구를 통해 일정변형을 압밀시험법이 저응력 영역을 포함할 수 있으므로 초연약 점토의 압밀시험으로 적당하다는 사실을 밝혔다.⁴⁾

일정 변형을 압밀시험법(Constant Rate of Strain Consolidation test, 약어 CRS-test) 은 HAMILTON 등에 의해 선행 압밀 응력 및 간극비-유효응력 곡선의 조기 결정법으로써 이용된 이후 SMITH & WAHL, BYRNE & AOKI 에 의해 간극비-유효응력 관계, 압밀계수를 구하는 이론적 접근이 시도되었다. 또, WISSA, CHRISTIAN, DAVIS & HREIBERG 는 미소변위를 가정하고 三笠와 DAVIS & RAYMOND 에 의해 제시된 변위에 대한 압밀 방정식을 이용하여 공시체내의 변위 분포식을 유도했다. 또, 압밀계수 및 평균 유효응력을 선형 및 비선형인 경우에 대해서 구했다. 그 후 CRS 시험법은 여러 연구자에 의해 연구되고 있는 상황이다. 그러나, 준설패립 점토를 비롯한 초연약 점토에 관한 시험에 대해서는 그다지 진전된 바가 없는 실정이고 더욱 연구 되어야 할 부분이다.

따라서 본 연구에서는 준설패립 점토지반을 대상으로 하여 유동학적 특성을 고려한 강도시험과 연속재하방식을 이용한 압밀시험을 실시하여 준설패립 점토지반의 거동을 규명하고 준설패립 점토의 취급에 필요한 설계자료를 제시하는데 그 목적이 있다. 그리고 연구의 목적인 준설패립 점토지반의 압밀 및 전단강도 특성을 파악하기 위해 준설패립 후 슬러리 상태의 점토를 대상으로 하여 실험적 연구를 실시하였다.

전단강도를 구하는 방법으로는 본 연구를 위해 특별히 고안하여 개발한 얇은 판 관입시험기를 이용하였다. 이 관입시험기는 얇은 판과 스프링을 이용하여 하중을 정적으로 재하하여 관입시키고 그때의 전단강도를 구하는 정적 관입시험기와 얇은 판과 스프링을 이용하고 관입속도를 조절할 수 있도록 고안된 유동적 관입시험기의 두가지를 개발, 이용하여 준설패립 점토의 강도를 직접 및 유동모델을 이용하여 추정하는 방식을 취하였다. 또한, 본 연구에 개발, 이용된 강도 시험장치의 신뢰성을 입증하기 위해 기존의 초연약 점토의 강도시험 결과와 비교 검증하였다.

압밀시험은 연속재하 압밀시험법중 일정변형을 압밀시험법을 이용하여 압밀특성을 파악하였다. CRS 압밀시험기의 재하장치는 실험중에는 압밀속도를 일정하게 유지하도록 제작하였으며 압밀 셀은 직경이 18.3cm, 12.1cm 및 6.0cm인 세 종류의 셀을 사용하였다. 또, 압밀이 진행됨에 따른 강도특성의 변화를 관찰하여 슬러리 점토의 간극비-강도 관계를 제시하였다.

2. 이론적 배경

2.1 준설점토의 전단특성

흙의 전단강도를 구하는 방법으로는 직접전단시험, 일축압축시험 및 삼축압축시험 등을 통해서 흙의 점착력과 내부마찰각을 얻는다. 그러나, 초연약 점성토의 전단강도는 점착력과 내부마찰각을 명확히 분리하는 것이 어렵고, 오히려 전 전단강도를 이용하여 취급하는 것이 합리적이다.

준설점토는 시간종속적 비뉴톤 유체적 거동을 하므로 그 전단강도는 변형속도에 의해 지배된다. 대체적으로 변형속도가 커짐에 따라 전단강도는 커지게 되고 이 관계는 각종의 유동학적 모델에 의해 설명되고 있다.

그런데 문제는 준설점토의 강도를 측정하는 것이다. 종래의 전단강도 시험법으로는 강도측정이 불가능하다. 현재 배인 시험기와 회전점도계를 이용한 방법이 주로 이용되고 있는데 이들 시험법에는 몇가지의 문제점을 갖고 있다. 배인 시험기는 배인의 날개를 직경으로 하는 원통을 전단면으로 가정하여 해석하는데, 초연약 상태에서는 원통형의 전단면이 형성되지 않을 뿐만 아니라 전단면의 추정도 대단히 어렵다. 따라서 실험결과의 이용에 있어서 상당한 주의를 필요로 하고 실험조건을 반드시 고려하여야 한다. 회전점도계를 이용하는 방법은 현탁액 혹은 슬러리 상태의 강도를 측정하는 방법중에서 가장 합리적인 시험법으로 알려져 있다. 그러나 점토의 유동특성의 가정과 변형속도의 제어방법에 따라 강도가 크게 달라지는 점에 유의해야 하고 장치가 정교하므로 자동 제어 및 기록 장치가 없으면 정도를 유지하기가 어렵다. 따라서 고가의 부수장치가 필요하므로 실용적으로 사용되지 못하고 있는 실정이다.¹²⁾

준설점토와 같은 슬러리 상태에 있어서 강도는 변형속도가 영일 때의 강도이다. 따라서 적당한 유동학적 모델을 이용하여 영변형율의 전단강도를 추정하게 되는데 적용 모델과 실험시 변형속도의 범위에 따라 상당히 다른 전단강도를 추정하게 된다. 따라서 이 방법의 적용에 있어서는 특별한 지식이 필요하게 되는데 즉 준설점토의 레올로지를 알아야 한다.⁸⁾

통상 비뉴톤 유체는 전단응력과 전단변형율의 관계가 비선형이라고 본다. 즉, 비뉴톤 유체의 점도는 온도나 압력에 따라 일정하지 않으며 변형속도에 지배된다. 이런 비뉴톤 유체의 전단거동에 대해서 시간독립적 유체, 시간종속적 유체, 점탄성 유체의 세 부류로 나뉘어진다. 준설점토는 시간종속적인 성격이 강하지만 일정 시간이 경과하여 압밀되면 점탄성적인 면이 부각된다. 시간종속적 유체의 해석은 대단히 어려우므로 실용상 시간독립적 유체로 단순화시켜 식(2-1)의 관계로 해석한다.⁵⁾⁸⁾¹²⁾

$$r = f(\tau) \quad (2-1)$$

여기서, r 은 변형속도, τ 는 전단응력이다. 식(2-1)을 보다 구체화시켜 보면 (그림 2-1)의 4 종류로 구분할 수 있다. Bingham 소성체의 대표적인 모델식은 1929년 BINGHAM 에 의해 식(2-2)와 같이 제안되었

다.

$$\tau = \tau_y + \eta_p r \quad (2-2)$$

여기서 τ_y 는 항복 전단응력이며, η_p 는 소성점도이고 r 은 전단변형 속도이다.

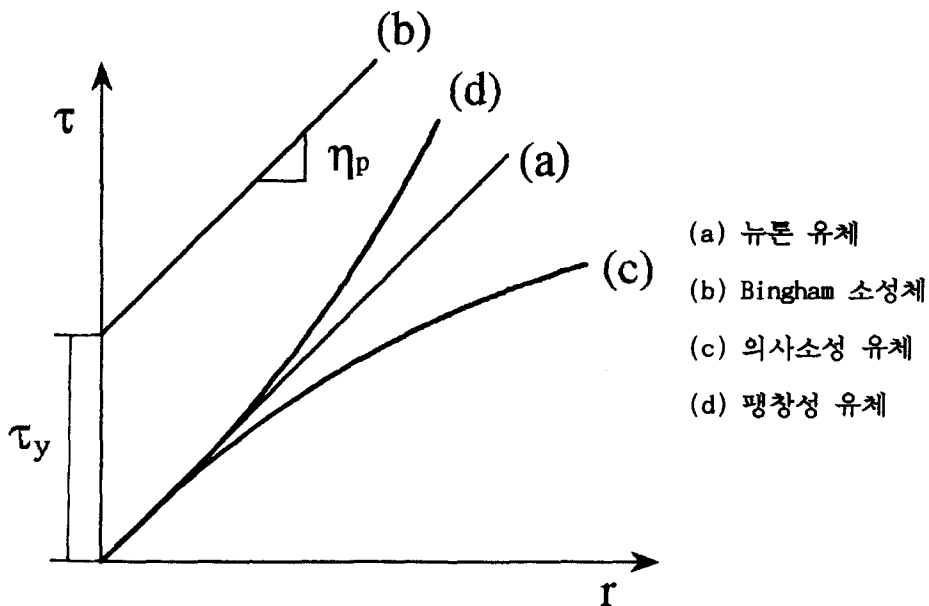
의사소성 유체는 WABBLE 과 OSTWALD 를 비롯하여 여러 사람이 서로 다른 모델식을 제시하였으나 그중 대표적인 모델은 식(2-3)과 같이 표현되며, 멱승측 모델(Power law model)이라 불린다.

$$\tau = k r^n \quad (2-3)$$

여기서, k, n 은 재료에 따른 상수이다.

팽창성 유체는 다이래턴시를 유발시키는 유체를 말하지만 준설편도인 경우에는 입자간의 접촉이 거의 무시되므로 고려하지 않는다.

슬러리 점토에 대해 회전점도계를 이용한 전단특성에 관한 실험적 연구로 전단 변형속도가 적은 영역에서 Bingham 모델을 적용함이 합리적이며 속도가 빨라짐에 따라 멱승측 모델로 설명된다고 알려져 있다.



(그림 2-1) 전단응력과 전단변형률 관계

2.2 일정변형을 압밀이론

점성토 지반의 압밀현상을 해석하고 침하를 예측하기 위해서 실내 시험을 통해 압밀정수를 파악함은 물론 현장계측을 통해 얻은 자료를 이용하여 종합적으로 해석해야 한다. 이때 가장 초보적이면서도 중요한 인자는 압밀정수이다. 지금까지 거의 대부분의 압밀현상은 TERZAGHI 압밀이론에 의해 해명되어 왔으며 또한 해석이 간편하기 때문에 널리 이용되고 있는 실정이다. 정확도 면에서도 지반을 여러 층으로 나누어 해석함으로써 그 정도를 상당히 높일 수 있으므로 현장적용 및 이용상 편리한 이론임에는 반론의 여지가 없다고 하겠다.

그러나, 준설패립 점토지반에의 적용성에 대해서는 문제의 심각성이 있다. 준설패토는 고함수비의 초연약 점토로서 투기후 초기에는 침강과정을 거치게 되고 그 후 자중압밀과정을 거쳐 스스로 상당량의 침하가 발생한다. 또 그 침하량은 대단히 크므로 미소변형 이론의 적용은 많은 문제점을 갖게 되고 三笠나 GIBSON 등의 유한변형 압밀이론을 적용해야 한다.

TERZAGHI 이론의 적용상 한계는 실험방법상에도 존재한다. TERZAGHI 이론에 입각한 시험법인 표준압밀 시험은 초기에 0.05 kg/cm^2 을 재하하도록 되어 있으나 준설패토는 이 정도의 하중에 견딜 수 있는 강도를 갖지 못하므로 시험기의 틸새를 타고 시료가 새어나오는 누출현상(squeezing)이 발생하게 되고 또, 재하시 피할 수 없는 최소한의 충격에 의해서도 이 현상은 가속화된다. 이러한 제약에 의해 준설패토의 압밀시험은 충격을 제거하고 저응력 범위까지도 포함할 수 있는 연속재하방식을 채택해야 한다. 연속재하 방식으로는 일정변형을 압밀시험, 일정하중을 압밀시험 및 일정동수구배 압밀시험 등이 있는데 본 연구에서는 일정변형을 압밀시험을 채택하였다.⁴⁾¹⁸⁾

일정 변형을 압밀시험에 사용되는 압밀방정식은 식(2-4)을 기본방정식으로 한다.¹⁵⁾¹⁹⁾

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} \quad (2-4)$$

여기서, ε 은 연직변형을, t 는 시간, c_v 는 압밀계수, z 는 시료 상부로 부터의 깊이이다. 식(2-4)에 무차원 공간변수 $X=z/H$ 와 무차원 시간변수 $T_v=C_v t/H^2$ 를 도입하여 압밀중의 임의 시간, 임의 점에 대한 변형을 구하면 식(2-5)와 같다.

$$\varepsilon(X, T_v) = r t [1 + F(X, T_v)] \quad (2-5)$$

여기서, r 은 일정변형률, H, z 는 각각 시료의 전체높이 및 상부 배수면으로부터의 깊이를 나타내고 있으며 $F(X, T_v)$ 는 식(2-6)으로 나타난다.

$$F(X, T_v) = \frac{1}{6T_v}(2-6X+3X^2) - \frac{2}{\pi^2 T_v} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\pi X)}{n^2} \exp(-n^2 \pi^2 T_v) \quad (2-6)$$

여기서 우변 첫번째 항은 시간에 대한 독립변수이며 정상상태일 때 일정한 간극수의 흐름을 발생시키기 위해 동수구배가 형성됨에 따라 나타나는 평균변형율의 편차를 나타내고 있다. 또한, 우변 두번째 항은 전이상태를 시간에 대한 종속변수로 나타내며 실험직후 발생하는 간극수압이 시간 경과에 따라서 지수함수 형태로 감소됨을 보이고 있다.

결국 식(2-6)는 압밀현상 발생에 있어서 정상상태와 전이상태를 동시에 나타내고 있어 일정변형율 압밀시험을 해석하기 위해 위의 두 경우로 나누어 생각할 수 있다. 정상상태 조건과 시료의 응력-변형 관계가 비선형일 때의 일정변형율 압밀시험 해석식은 식(2-6)에서 전이상태를 나타내는 우변 두번째 항을 제거하면 정상상태만으로 나타나는 식(2-7)을 얻을 수 있게 된다.

$$\varepsilon(z, t) = rt + \frac{rH^2}{C_v} \left\{ \frac{1}{6} \left[3 \frac{z^2}{H} - 6 \frac{z}{H} + 2 \right] \right\} \quad (2-7)$$

식(2-7)을 이용하여 임의시간 t 에서 시료 상, 하부의 변형차 $\Delta\varepsilon$ 를 구하면 식(2-8)과 같이 되며, 임의 시료깊이에서 임의 시간 t_1 과 t_2 사이의 변형차는 $r(t_2-t_1)$ 이 된다.

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon(1, t) - \varepsilon(0, t) = \frac{1}{2} \frac{rH^2}{C_v} \quad (2-8)$$

시료상부에 가해지는 연직응력 σ_v 는 측정값으로 알 수 있고 상부 배수, 하부 비배수의 실험조건에 의하여 시료 상, 하부 사이의 유효응력차는 시료하부에서 측정되는 과잉 간극수압이 된다.

비선형 재료에 대하여 식(2-9)와 같이 나타나는 압축지수를 사용하고 미소변형 조건일때 식(2-9)는 변형지수로 나타내는 식(2-10)과 같다.

$$-\frac{de}{d(\log \sigma_v)} = C_c \quad (2-9)$$

$$-\frac{d\varepsilon}{d(\log \sigma_v)} = \frac{C_c}{(1+e)} \quad (2-10)$$

일정변형율 압밀시험에서 전응력과 유효응력, 그리고 간극수압은 측정 가능한 값이고 식(2-9)는 식(2-11) 혹은 식(2-12)로 근사시킬 수 있다.

$$\frac{\varepsilon(0,t) - \varepsilon(H,t)}{\log \sigma_v - \log(\sigma_v - u_b)} = C_e \quad (2-11)$$

$$-\frac{rH^2}{2 C_v \log\left(\frac{\sigma_v - u_b}{\sigma_v}\right)} = C_e \quad (2-12)$$

임의 시간 t_1 과 t_2 사이의 시료상부에서의 변형지수는 식(2-13)과 같고 식(2-12)와 (2-13)에 의하여 CRS 압밀시험에 의한 압밀계수는 식(2-14)과 같이 구할 수 있게 된다.

$$C_e = \frac{r\Delta t}{\log\left(\frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}}\right)} \quad (2-13)$$

$$C_v = -\frac{H^2 \log\left(\frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}}\right)}{2 \Delta t \log\left(1 - \frac{u_b}{\sigma_v}\right)} \quad (2-14)$$

여기서, u_b / σ_v 는 Δt 동안의 평균치를 사용하게 되며 σ_{v1} 과 σ_{v2} 는 각각 시간 t_1 과 t_2 에서 시료에 작용하는 평균 유효연직응력, 그리고 u_b 는 시료하부에서 측정되는 과잉 간극수압을 나타낸다. 또한, 시료에 작용하는 평균 유효응력은 식(2-15)에 의해 구할 수 있다.

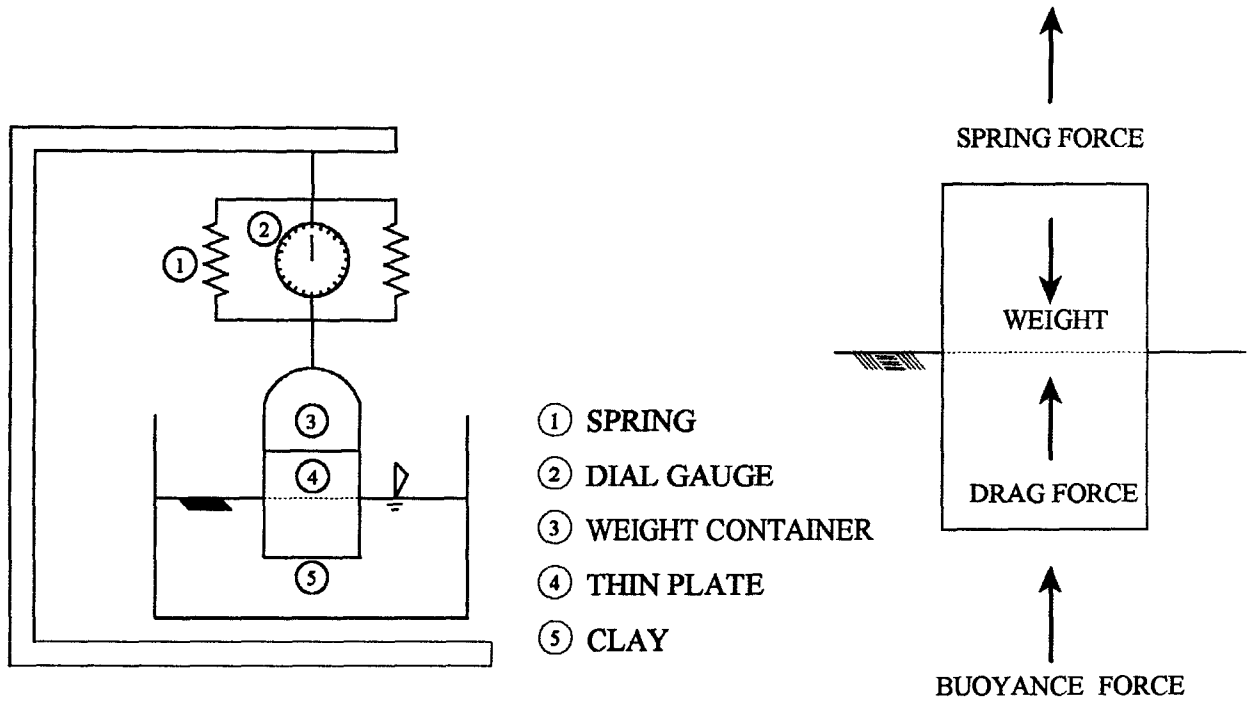
$$\overline{\sigma_{ave}} = (\sigma_v^3 - 2 \sigma_v^2 u_b + \sigma_v u_b^2)^{1/3} \quad (2-15)$$

2.3 얇은 판 관입이론

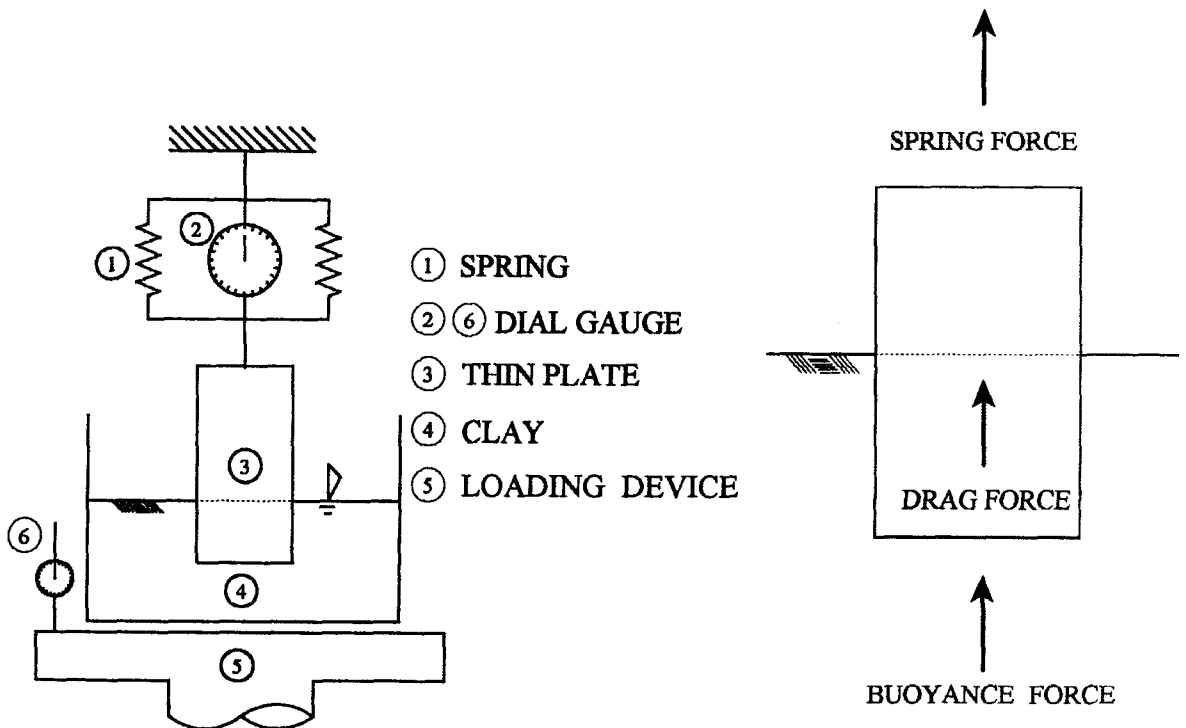
본 연구에서는 재래의 방식이 갖고 있던 문제점을 수정, 보완한 새로운 시험방법을 개발하여 (그림 2-2) 및 (그림 2-3)에 그 개념도를 제시했다. 얇은 판을 슬러리 상태의 시료에 관입하면 저항력이 발생하게 된다. 이때 저항력은 판의 주면을 따라 발생하는 전단력(drag force)과 관입된 체적에 대해 유발되는 부력으로 이루어진다고 보고 평형조건을 고려하여 전단강도를 구하는 방법을 고려하였다.

(그림 2-2)는 정적 얇은 판 관입시험 장치를 설명한 것이다. 재하용기에 하중 dW 를 재하하면 dh 만큼의 관입이 유발되고 이때 관입량은 용수철 가운데 설치한 변위계에 의해 측정하게 된다. 즉, 이때 그림에 제시한 힘 이외의 다른 힘은 없다고 가정한다. 하중 dW 로 인한 힘의 평형에 이르게 되면 판의 관입은 중단되고 이때의 평형방정식은 다음과 같다.

$$dW = k dh + 2 (d+t) dh \tau_y + t d dh \gamma_c \quad (2-16)$$



(그림 2-2) 정적 얇은 판 관입시험 장치 개요도



(그림 2-3) 유동적 얇은 판 관입시험 장치 개요도

여기서, k 는 스프링 상수, dW 는 하중, τ_y 는 항복전단강도, d 는 판의 폭, t 는 판의 두께, dh 는 관입 깊이이고 γ_c 는 점토의 단위중량이다. 식(2-16)을 전단강도에 대해 정리하면 식(2-17)과 같다.

$$\tau_y = \frac{dw/dh - k - t\gamma_c}{2(d+t)} \quad (2-17)$$

하중-관입량 그래프에서 기울기를 구하면 dW/dh 가 되고 이것을 식(2-17)에 대입하면 τ_y 를 간단히 구할 수 있다.

(그림 2-3)은 유동적 관입시험장치를 설명하는 그림으로써 (그림 2-2)와 개념은 동일하지만 하중을 재하하는 대신 재하장치를 이용하여 속도를 조정하면서 관입시킨다. 그때 평형방정식을 고려하면 (그림 2-2)에 제시한 바와 유사하지만 정적 평형 상태가 아니므로 전단응력은 항복 전단응력보다는 큰 전단응력이 발휘되는데 이 전단응력을 τ 라 하면 식(2-18)과 같은 평형방정식이 구성된다.

$$k dx = 2 (d+t) dh \tau + t d dh \gamma_c \quad (2-18)$$

여기서 dx 는 스프링의 수축량이고 dh 는 관입 깊이이다. 식(2-18)을 τ 에 대해 정리하면 식(2-19)와 같다.

$$\tau = \frac{kdx/dh - t\gamma_c}{2(d+t)} \quad (2-19)$$

식(2-19)에서 구한 전단응력과 관입속도와의 관계를 도식하고 적절한 모델식을 이용하거나, 얻어진 자료를 회귀분석하여 영변형율에서의 전단응력 즉, 전단강도를 구하면 된다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 시료의 선정

시료는 (그림 3-1)에 표시된 일산, 인천, 군산, 여수, 광양등 우리나라 서·남해안지역에서 채취된 해상 퇴적 점토시료이다. 시료에는 조개껍질을 비롯한 각종의 불순물 및 유기물질이 혼합되어 있으므로 자연건조시킨 후 #40 체로 체가름하여 통과된 시료를 사용함으로써 현장성을 확보한 상태에서 균질성을 향

상시켰다. 또한 각 시료의 토질정수는 <표 3-1>에 표시한 바와 같다.

<표 3-1> 시료의 토질정수

SAMPLE TEST		일산	군산	인천	광양	여수
Gs		2.69	2.69	2.69	2.70	2.71
CONSISTENCY	LL(%)	28.5	36.0	36.8	55.3	64.3
	PL(%)	22.5	24.8	23.2	25.1	31.2
	PI(%)	6.0	11.2	13.6	30.2	33.1
USCS		ML	ML	CL	CH	CH
SAND(%)		15.2	11.2	7.6	5.5	3.2
SILT, CLAY (%)		84.8	88.8	92.4	94.5	96.8



(그림 3-1) 각 시료의 채취지역

3.2 실험장치

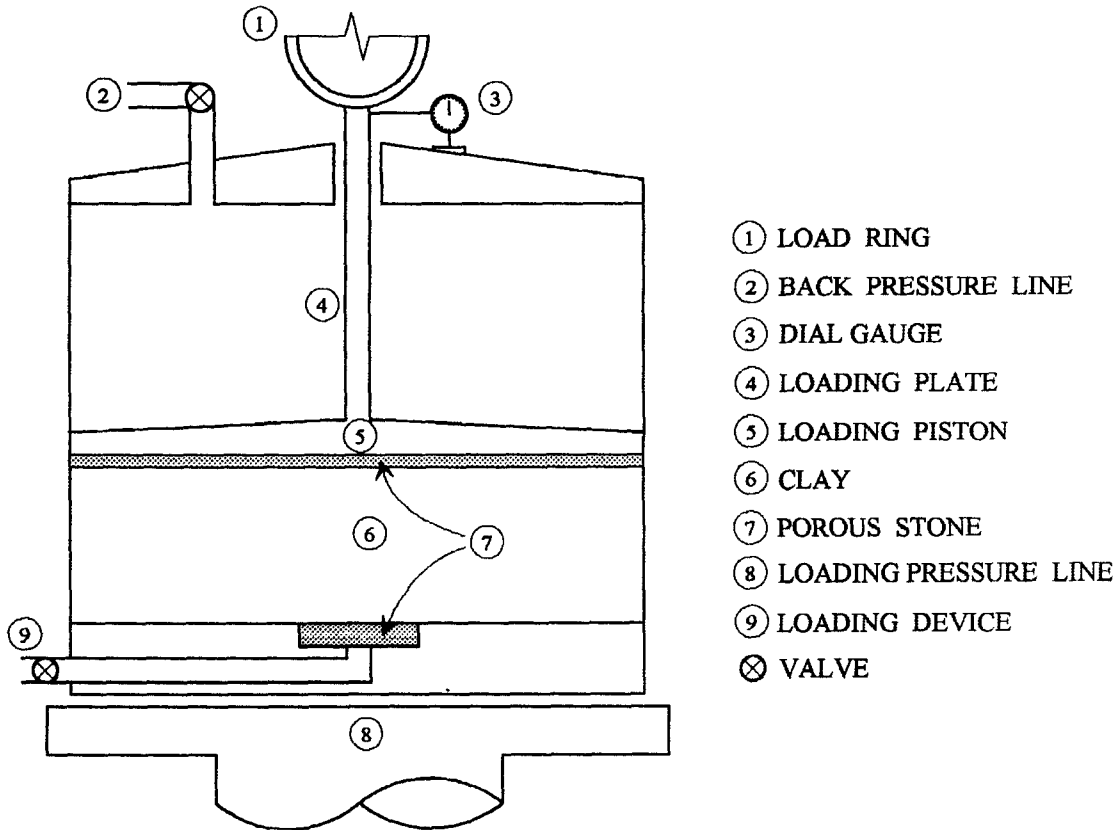
압밀시험용 실험장치는 (그림 3-2)와 같고 얇은 판 관입시험 장치는 (그림 2-2) 및 (그림 2-3)에 개요도를 나타내었다.

압밀시험장치는 직경이 18.3 cm, 12.1 cm 및 6.0 cm 인 세 종류의 셀을 이용하였으며 가압판에는 여러 개의 구멍을 뚫고 아래쪽에는 다공석판을 부착시켜 상부배수를 허용하도록 하였고 하부는 배수를 허용하지 않으며 간극수압 측정장치를 연결하도록 하였다. 또 재하장치는 압밀속도를 0.0005 - 1.2 cm/min 의 범위내에서 자유롭게 조절할 수 있도록 하고 하중은 하중계(load ring)을 이용하여 읽고 그때의 변위량을 1/100 mm 변위계에 의해 읽도록 하였다. 간극수압은 美 SLOPE 사의 센서 및 트랜스듀서를 사용하였다.

관입 시험장치 (그림 2-2)의 경우는 재하통에 하중을 정적으로 재하하고 평형상태에 이르게 되면 스프링 사이에 설치한 변위계를 통해 관입된 깊이를 측정하도록 되어있다. (그림 2-3)은 변형속도 r 로 관입시키게 되면 스프링에는 부의 하중이 걸리게 된다. 따라서 스프링의 수축량과 재하장치의 이동량을 각각 두개의 변위를 측정하여 관입깊이 및 관입하중을 계산했다. 길이 $h=200\text{mm}$, 폭 $d=50\text{mm}$, 두께 $t=2\text{mm}$ 의 얇

은 판을 이용하였고 재질은 스테인레스이다.

시료를 조제하기 위해서 사용한 시료용기는 직경 8.3 cm 높이 15 cm 의 프라스틱 재질의 투명한 뚜껑이 있는 통을 사용함으로써 시료의 관찰을 용이하게 하고 증발에 의한 영향을 배제하였다.



(그림 3-2) 일정변형을 압밀시험장치 개요도

3.3 실험방법

프라스틱 투명한 시료용기에 각 시료를 5~6가지의 서로 다른 함수비로 조정하여 하루이상 수침시킨 후 프로펠라 교반기를 이용하여 충분히 교반하고 즉시 (그림 2-2)의 정적 관입시험을 실시한다. (그림 2-2)와 같이 시료를 설치하고 관입장치를 시료에 얇은 판이 약간 관입될 정도로 높이를 조정한다. 영입 음값을 기록하고 재하용기에 핀셋을 이용하여 충격을 최소화 할 수 있도록 하중을 재하한다. 재하후 판의 관입을 변위계를 통해 관찰한다. 관입이 종료되면 평형상태에 도달한 것으로 보고 그때의 하중 및 관입량을 기록하고 같은 방법으로 5-6 단계 반복한다. 얻어진 하중 dW 와 관입량 dh 의 관계는 선형관

계를 나타내게 되고 이 때의 기울기를 구하면 dW/dh 가 되고 식(2-17)을 이용하여 전단강도를 구한다.

정적 관입시험이 종료되면 3일간 방치한 후 정적 관입시험 및 유동적관입시험을 실시한다. 유동적 관입시험은 (그림 2-3)의 장치를 이용하여 재하대위에 시료를 설치하고 관입장치를 시료에 얇은 판이 약간 관입될 정도로 높이를 조정한다. 영입음을 하고 0.02 cm/min 의 속도로 관입을 실시한다. 이때 시간과 두개의 변위계를 1분 간격으로 5분간 읽는다. 계속해서 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 cm/min의 속도로 관입시험을 실시하고 읽음값을 이용하여 스프링 수축량 dx 와 관입량 dh 를 계산하고 $dx-dh$ 의 관계로부터 dx/dh 를 구하고 식(2-19)를 이용하여 τ 를 각 관입속도에 대해 구한다. 또 각 데이터를 취합하여 전단응력-관입속도의 관계를 도시하고 회귀분석하여 τ 축 절편을 구하면 이 절편이 영변형율에서의 전단응력이 된다. 정적 및 유동적 관입시험이 종료되면 다시 방치하여 5일 경과 후 같은 방법으로 관입시험을 실시한다.

(그림 3-2)의 CRS 압밀시험기에 시료와 물을 넣고 충분히 교반시켜 준설 투기후 초기 슬러리 상태를 재현하도록 하였다. 이때, 초기높이는 직경의 1/3을 넘지 않도록 하였다. 슬러리 상태의 점토시료의 제작이 끝나면 즉시 정적 관입시험을 실시하여 초기상태의 전단강도를 구한다. 압밀속도는 시료의 토질정수를 고려하여 선택하고 과잉 간극수압비(u_b / σ)가 30%를 넘지 않고 시료의 누출현상이 발생하지 않는 속도로 조정하여 CRS 압밀시험을 실시한다. 시험시작전에 영입음을 하고 시험이 시작되면 시간, 변위, 하중계를 최초 10분간은 매 1분, 그 이후는 매 5분 마다 읽는다. 압밀이 진행됨에 따라 약 1 시간마다 제하(rebound)를 실시하는데 압밀속도와 같은 속도로 반향시킨다. 제하가 종료되면 재하판을 제거하고 정적 및 유동적 판 관입시험을 실시한 후 이어서 압밀시험을 계속한다. 직경에 비해 2mm 판은 얇다고 볼 수 있으므로 관입에 의한 시료의 교란 및 기타 영향은 무시했다. 압밀하중은 약 5 kg/cm^2 까지 재하하고 시험을 종료한다. 시험이 종료되면 관입시험을 실시하고 최종단계의 강도를 측정한다.

준설점토의 시간효과 및 함수비 변화에 따른 강도의 변화를 관찰하기 위한 실험으로 각 시료를 액성한계의 1-4 배 범위의 함수비로 조정하여 각각의 시료당 5 개의 서로 다른 함수비로 총 25 개의 플라스틱 용기에 시료와 물을 넣고 1 일 이상 방치한 후 충분히 교반시킨 후 정적 관입시험을 실시하고 시간이 경과함에 따라 정적 및 유동적 관입시험을 실시한다.

프라스틱 용기에 준설 투기후 초기상태를 재현할 수 있는 함수비로부터 액성한계부근의 함수비에 이르는 범위로 조정하여 시료와 물을 넣고 충분히 교반시켜 100 g 의 주문진 표준사를 약 5 분간에 걸쳐 시료에 충격을 가하지 않도록 서서히 부설하고 2일이 경과된 후 깊이별로 모래의 함유량을 측정하였다. 모래 함유량 측정방법은 시료를 위에서 부터 일정두께로 제거하고 체가름 시험에 의해 잔류모래량을 측정하여 (모래 잔류량 / 모래 부설량)과 깊이의 관계를 도시하였다.

4. 실험결과의 고찰 및 분석

4.1 얇은 판 관입시험 결과의 고찰

일산, 군산, 인천, 광양, 여수의 5개 시료에 대해 정적 및 유동적 관입시험을 실시하였다.

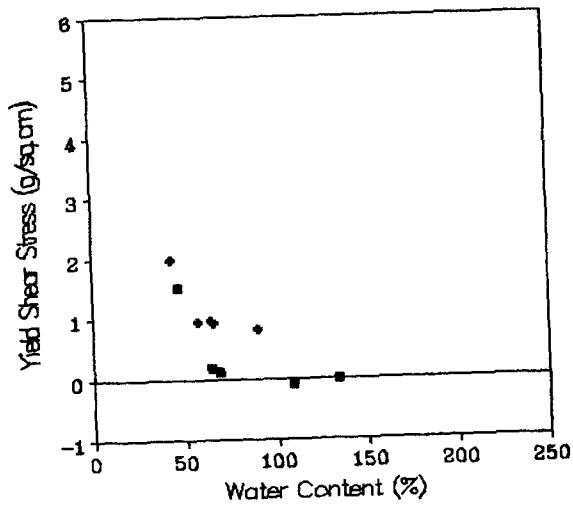
각 시료에 대해 초기함수비를 액성한계의 1~4 배로 조정하여 총 5 단계로 나누어 프라스틱 용기에 교반한 후 즉시 및 3일 경과후 각각 정적 관입시험을 실시하여 그 결과를 (그림 4-1)에 전단강도와 함수비의 관계로 나타내었다.

시료를 초기함수비로 충분히 교반한 후 즉시 관입시험을 했을 때 함수비가 커짐에 따라 전단강도는 음의 값을 나타내는 경향이 보인다. 이는 초기의 고함수비 상태에서는 침강현상이 발생하므로 하향력이 발생한 것으로 판단된다.

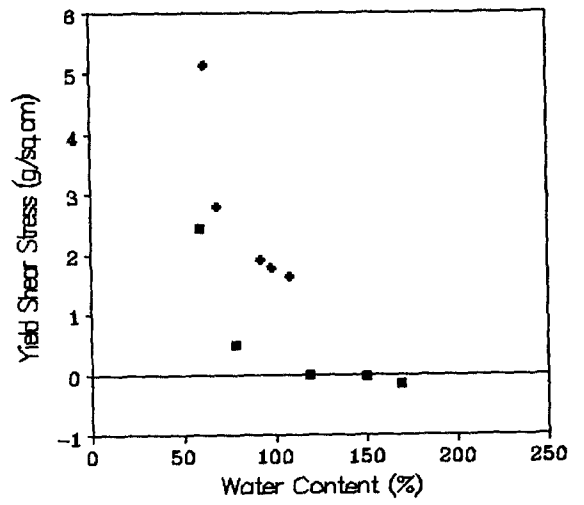
또 시간이 경과함에 따라 강도는 커지고 있으며 함수비가 대략 일산은 약 50 % 군산은 약 65 % 인천은 약 60 % 광양은 약 90 % 여수는 약 100 % 정도를 경계로 함수비가 감소할 수록 강도는 급격히 커지는 경향을 보인다.

각 시료에 대해 3일 경과후 유동적 관입시험 결과를 (그림 4-2)에 관입속도와 전단응력의 관계로 도시하였다. 또 결과 그래프의 내용을 요약하여 <표 4-1>에 나타내었다.

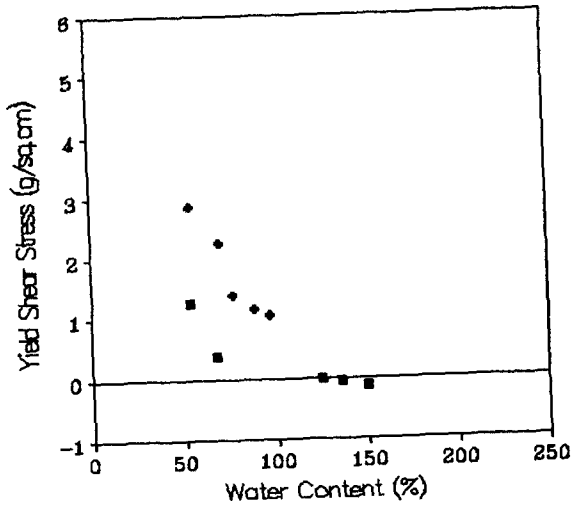
(그림 4-2)를 보면 대략 관입속도 0.1~0.2 cm/min 을 경계로 하여 저 관입속도 영역과 고 관입속도 영역으로 나누어 두개의 선형식으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 이때의 두 선형식은 식(4-1) 및 (4-2)로 나타낼수 있으며 각 측정치를 회귀분석하여 구체적으로 각 상수를 알아보면 <표 4-1>과 같다. 식(4-1)과 식(4-2)는 Bingham 모델이며 유동적 얇은 판 관입시험 결과로부터 각 대상시료는 두개의 Bingham 소성체 거동을 한다는 사실을 알 수 있다.



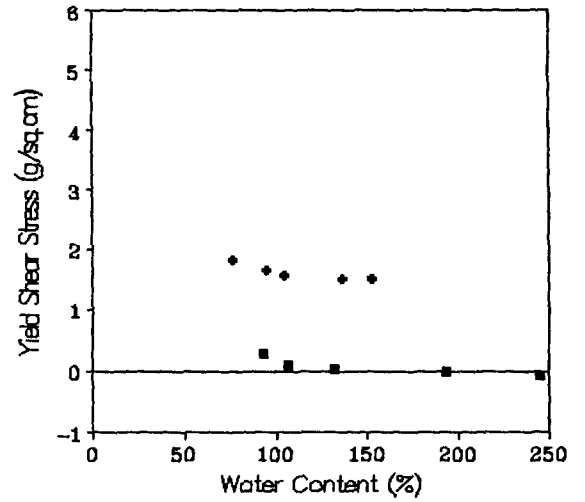
(a) 일산



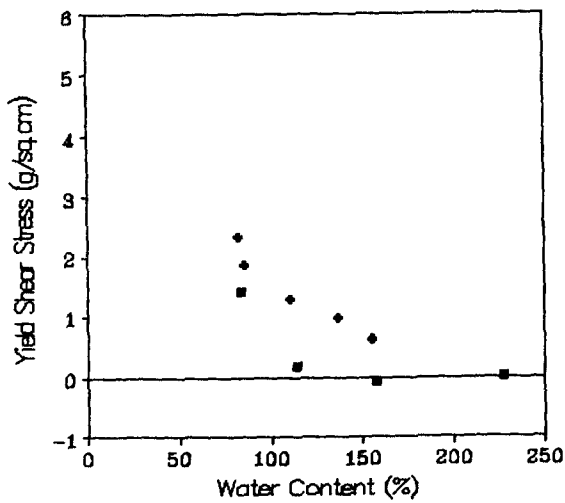
(b) 군산



(c) 인천



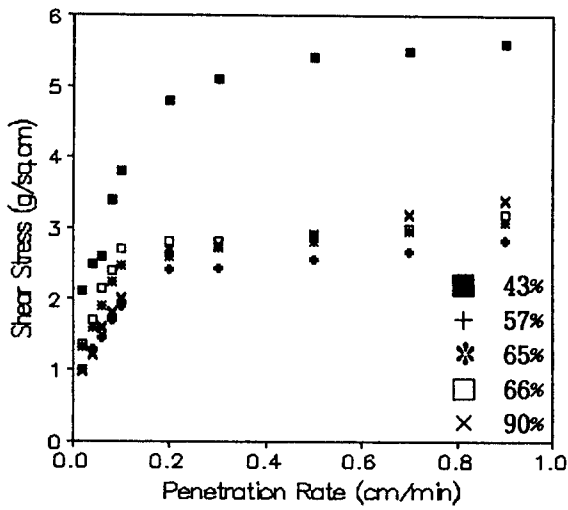
(d) 광양



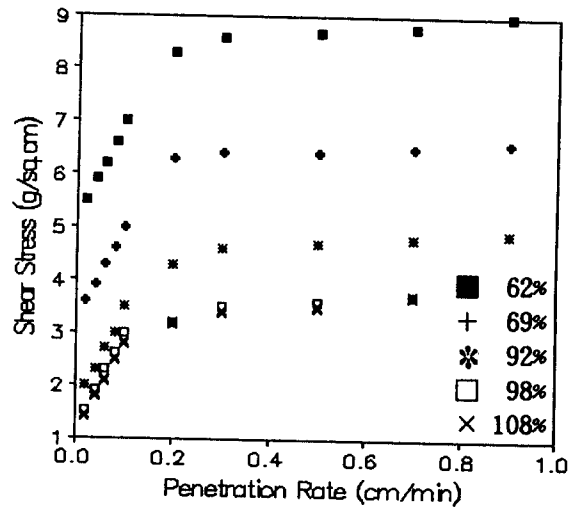
(e) 여수

■ 0일 + 3일

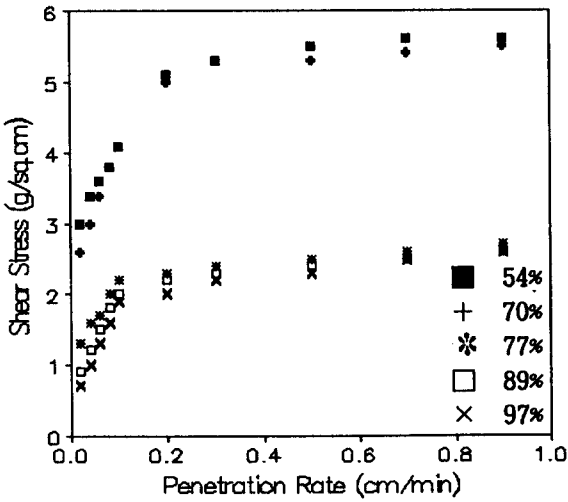
(그림 4-1) 각 시료의 정적 관입시험 결과



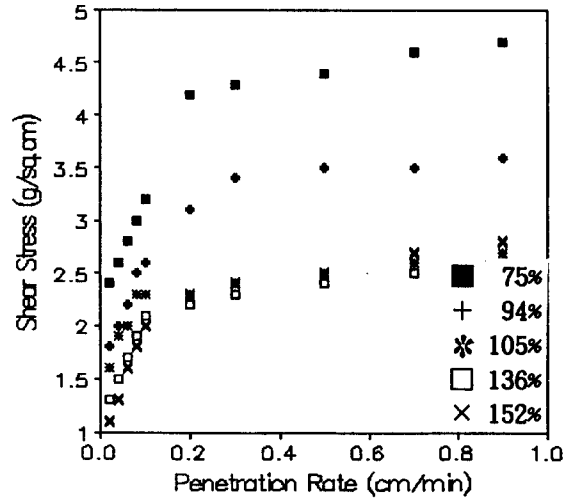
(a) 일산



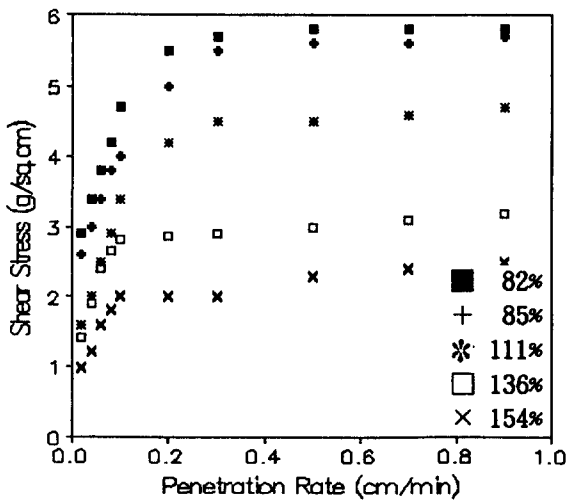
(b) 군산



(c) 인천



(d) 광양



(e) 여수

(그림 4-2) 각 시료의 유동곡선도

<표 4-1> 각시료의 유동적 관입시험 결과

SAMPLE	W(%)	$\tau_{y1}(g/cm^2)$	$\eta_{pl}(gmin/cm)$	$\tau_{y1}(g/cm^2)$	$\eta_{pl}(gmin/cm)$	$r_o(cm/min)$
일산	43	1.706	19.51	4.925	0.833	0.15
	57	0.926	9.53	2.251	0.633	0.17
	65	1.002	15.50	2.512	0.631	0.15
	66	0.946	19.25	2.643	0.503	0.08
	90	0.726	13.35	2.643	0.842	0.09
여수	82	2.503	21.74	5.713	0.135	0.20
	85	2.267	19.45	5.536	0.146	0.19
	111	1.159	22.46	4.419	0.272	0.18
	136	0.679	25.19	2.736	0.526	0.18
	154	0.721	13.62	1.843	0.825	0.17
인천	54	2.968	11.45	5.213	0.513	0.19
	70	2.215	19.53	5.116	0.461	0.20
	77	1.112	11.05	2.244	0.572	0.10
	89	0.627	15.51	2.134	0.534	0.10
	97	0.503	13.51	2.018	0.631	0.11
광양	75	2.187	10.54	4.213	0.513	0.21
	94	1.615	10.55	3.227	0.436	0.20
	105	1.435	11.05	2.244	0.473	0.10
	136	1.095	10.20	2.134	0.563	0.12
	152	0.879	11.57	2.218	0.536	0.13
군산	62	5.120	18.68	6.514	0.542	0.18
	69	3.214	18.06	6.238	0.402	0.17
	92	1.600	18.61	4.444	0.472	0.10
	98	1.178	18.21	3.314	0.563	0.09
	108	1.065	17.44	3.218	0.630	0.16

$$\tau = \tau_{y1} + \eta_{p1} r \quad (r \leq r_0) \quad (4-1)$$

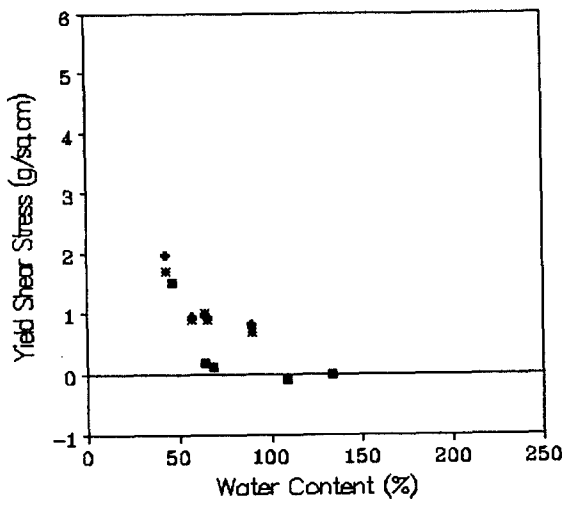
$$\tau = \tau_{y1} + \eta_{p1} r \quad (r \geq r_0) \quad (4-2)$$

<표 4-1>로부터 시험시 채택한 관입속도에 따라 영 관입속도에서의 전단응력은 대단히 큰 차이를 보인다는 것이다. 즉 고 관입속도에서 얻은 전단강도는 저 관입속도에서 얻은 전단강도에 비해 대단히 큰 값이다. 이 사실은 실험을 할때 어떤 속도를 이용하는가는 대단히 중요한 인자라는 사실을 시사하고 있으며 유동적 관입시험에 있어서 관입속도의 선정시 대상시료의 유동적 특성을 잘 알아야 함을 확인할 수 있다. 이미 서론에서 강조한 바와 같이 영 변형속도에서의 전단응력이 중요하므로 본 연구에서는 저 관입속도 영역에서 얻어진 τ_y 를 이 시료의 전단강도로 취하였다.

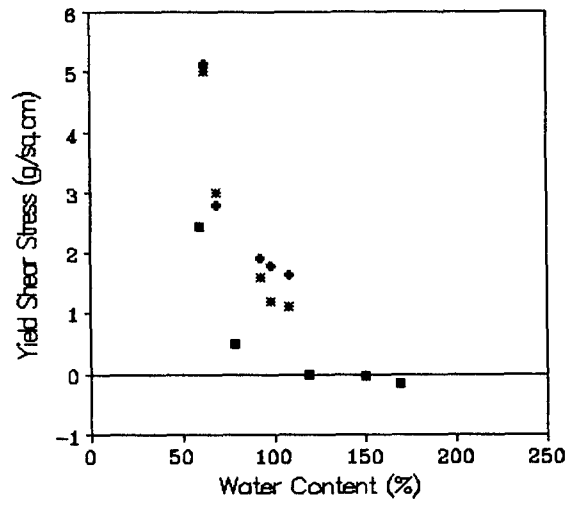
(그림 4-3)은 유동적 관입시험 결과로 구한 전단강도값을 (그림 4-1)에 중복시켜 그린 것이다. 여기서 알 수 있는 것은 정적 관입시험에 의한 전단강도보다 유동적 관입시험에 의한 전단강도가 약간 적은 값을 보이고 있다. 이는 정적 시험이라고는 하지만 재하시 피할 수 없는 최소한의 충격에 의한 영향으로 판단된다.

서로 다른 토성을 갖는 시료에 대해 함수비와 강도특성을 비교하기 위해 (그림 4-4)는 액성한계로 정규화한 함수비에 대해 강도특성을 도시하였으며 (그림 4-5)는 소성지수로 정규화하여 나타내었다. (그림 4-4)와 (그림 4-5)에서 강도는 5 가지 시료가 대체적으로 액성한계의 약 2배보다 적은 함수비에서 급격히 증가하고 있으며 여수, 인천, 광양 시료는 소성지수의 약 5배, 일산, 군산 시료는 소성지수의 약 10 배보다 적은 함수비에서 강도가 급격히 증가하는 강도 특성을 보이고있다.

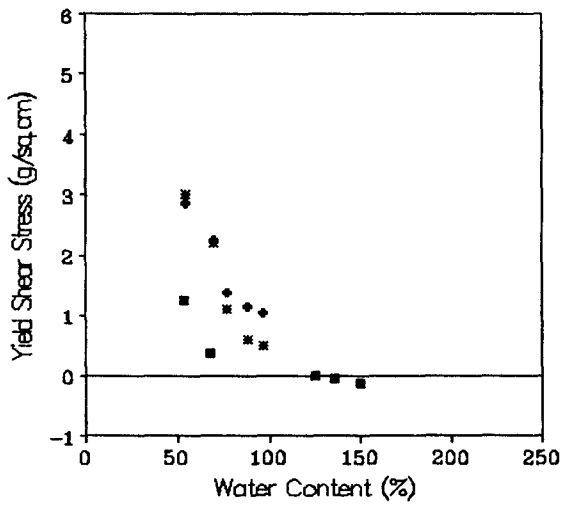
함수비에따른 강도특성을 요약하면 점토시료는 액성한계의 약 2 배 혹은 소성지수의 약 5 배, 실트 시료는 액성한계의 약 2 배 소성지수의 약 10 배 를 경계로하여 이 경계점보다 적은 함수비에서는 강도가 급격히 증가하는 경향을 보인다.



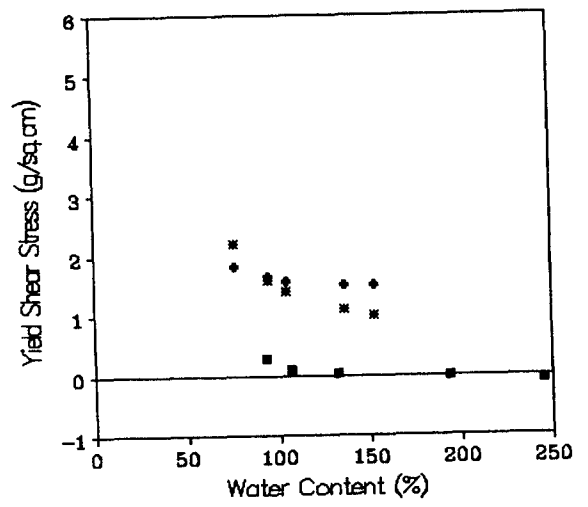
(a) 일산



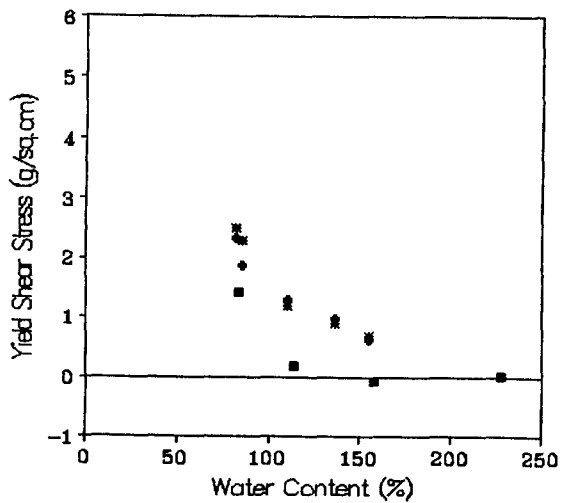
(b) 군산



(c) 인천



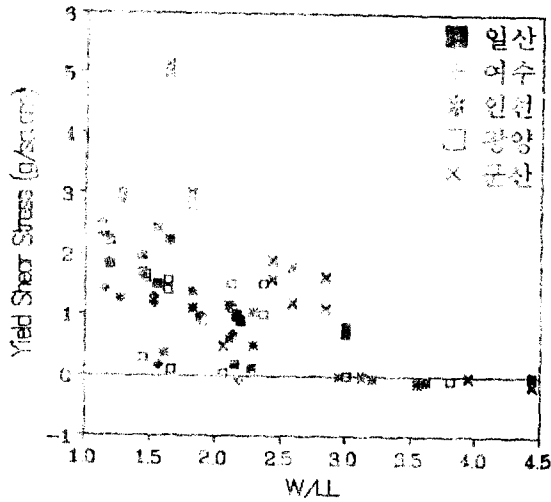
(d) 광양



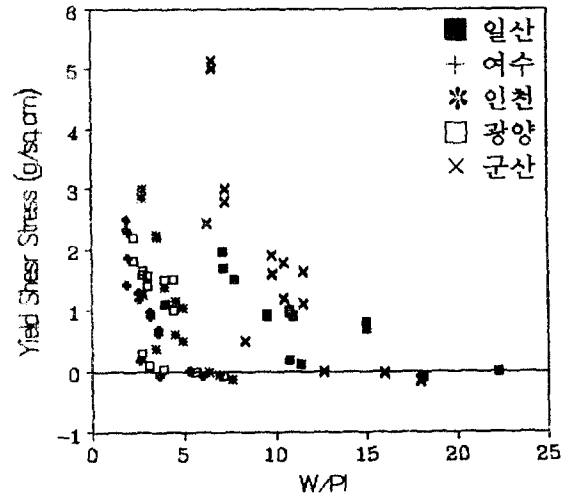
(e) 여수

■ 0일 + 3일 * 3일(유동)

(그림 4-3) 각 시료의 정적 및 유동적 관입시험 결과



(그림 4-4) 액성한계로 정규화한 각 시료의 관입시험 결과



(그림 4-5) 소성지수로 정규화한 각 시료의 관입시험 결과

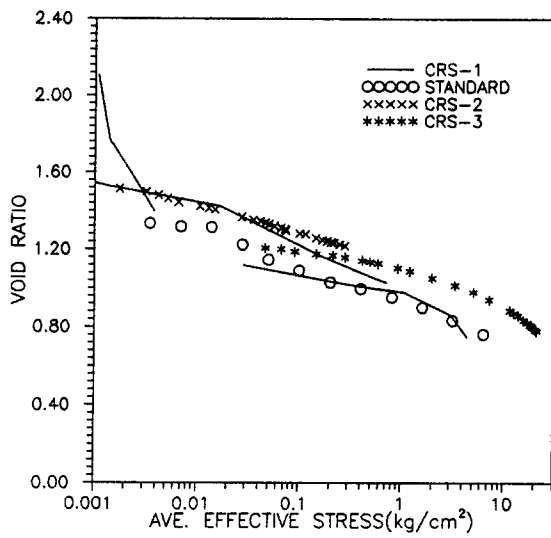
4.2 압밀시험 결과의 고찰

다음은 각 시료를 CRS 압밀시험 및 표준 압밀시험을 실시하여 그 결과를 (그림 4-6)에 나타내었다. 그러나 시료가 초연약 상태이므로 본래 표준압밀시험의 초기하중인 0.05 kg/cm^2 보다 훨씬 적은 하중인 0.0035 kg/cm^2 에 까지도 하중상태를 조절하여 이 값을 초기하중으로 하는 확장된 표준압밀시험을 이용하였다. 따라서 확장된 표준압밀시험을 실시하는데 소요된 시간은 총 12 일이었으며 CRS 압밀시험을 실시하는데 소요된 시간은 3~6 시간 정도이었다.

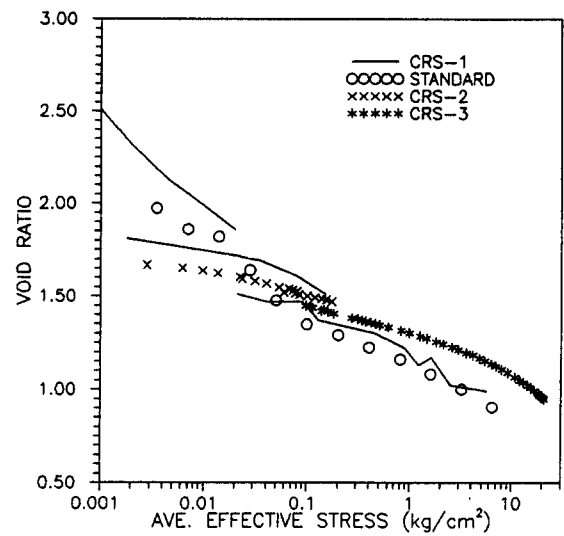
(그림 4-6)에서 CRS-1 으로 표시된 것은 시료를 액성한계의 2~3 배의 함수비로 조정된 초기함수비로 충분히 교반한 후 즉시 직경 12.1 cm 의 CRS 압밀시험기로 압밀시험한 것으로써 일정량의 압밀이 진행되면 제하를 실시하고 얇은 판 관입시험을 시료에 따라 2, 3회 실시하였다. CRS-2 는 CRS-1 과 같은 방법으로 시료를 조제하여 0.005 kg/cm^2 의 안정하중(seating pressure)을 가하여 충분히 안정된 상태의 시료에 대해 직경 18.3 cm 의 대형 CRS 압밀시험기를 이용하여 시험하였다. CRS-2 방식의 시험은 공시체의 직경이 크므로 일시에 10 kg/cm^2 의 하중범위까지 압밀시키는 데는 하중계의 용량문제가 있으므로 약 0.2 kg/cm^2 까지만 압밀시킨후 직경 6.0 cm 인 소형의 CRS 압밀시험기를 이용한 시험결과는 CRS-3 로 나타내었다. 또 확장된 표준 압밀시험은 STANDARD 로 표시하였다.

각 시험법을 비교해 보면 간극비-유효수직응력 관계는 대체로 비슷한 경향을 보이지만 CRS 압밀시험 결과의 경우 동일한 유효응력에서 표준압밀시험 보다 약간 큰 간극비를 보이고 있다. 특히 0.1 kg/cm^2 이하의 저응력 범위에서도 균일한 관계를 유지하고 있다. 즉 시험결과로부터 표준압밀시험을 기준으로 살펴볼때 거의 유사한 결과를 얻을 수 있으며 시험에 소요된 시간은 CRS 압밀시험이 약 15-30 배 빠른 시

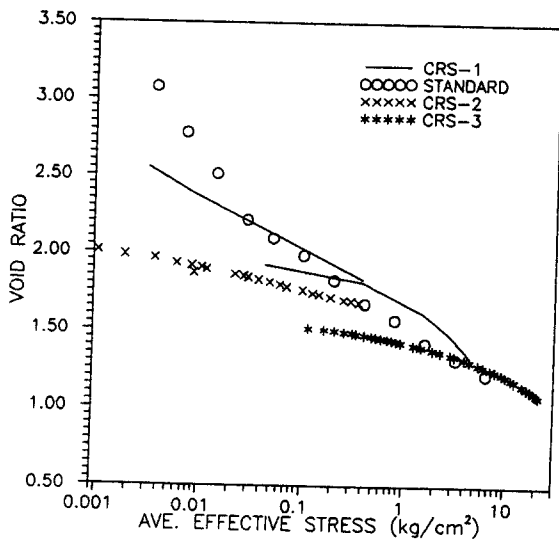
있으므로 CRS시험이 시간 단축효과가 크다고 할 수 있다. 그리고 CRS-1 압밀시험을 실시하는 과정에서 얇은 판 관입시험에 의한 강도시험을 병행하였다. 그 결과를 간극비와 강도와의 관계로 도시하여 (그림 4-7)에 나타내었는데 (그림 4-3)과 유사한 경향을 보이고 있다.



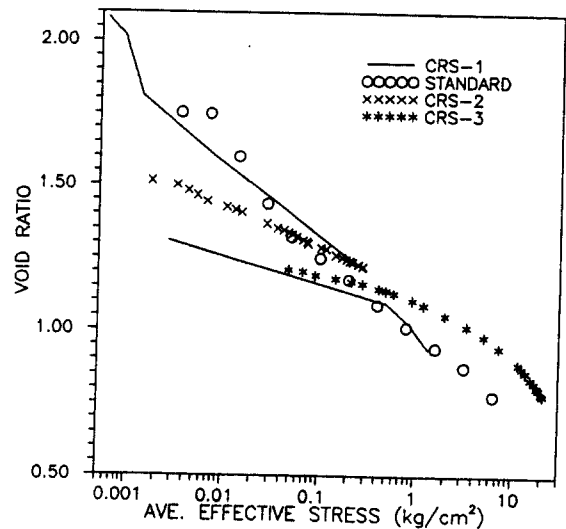
(a) 일 산



(b) 군 산

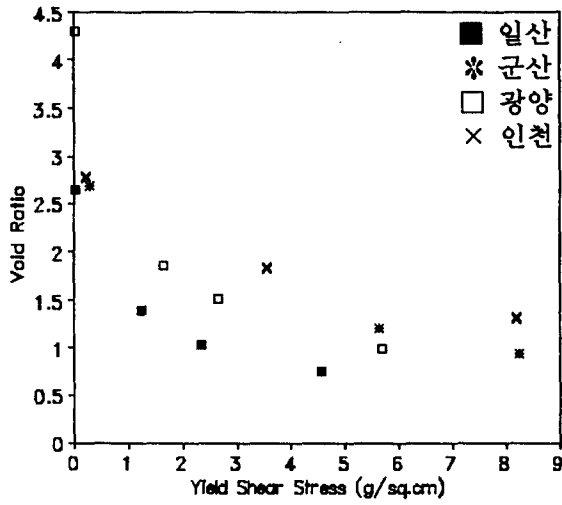


(c) 인 천



(d) 광 앙

(그림 4-6) 각 시료의 CRS 및 표준 압밀시험 결과

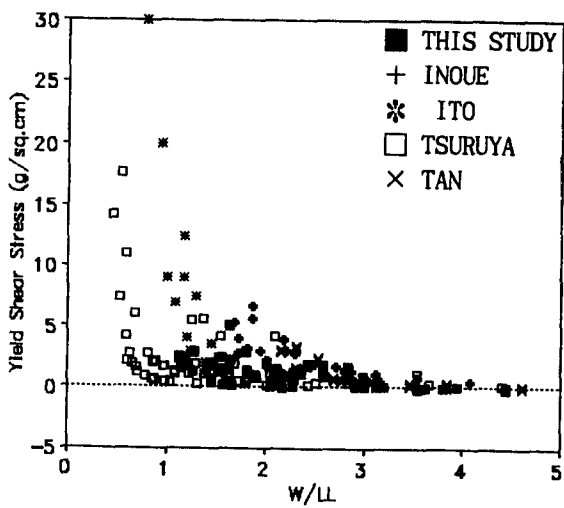


(그림 4-7) 각 시료의 간극비 - 강도 관계

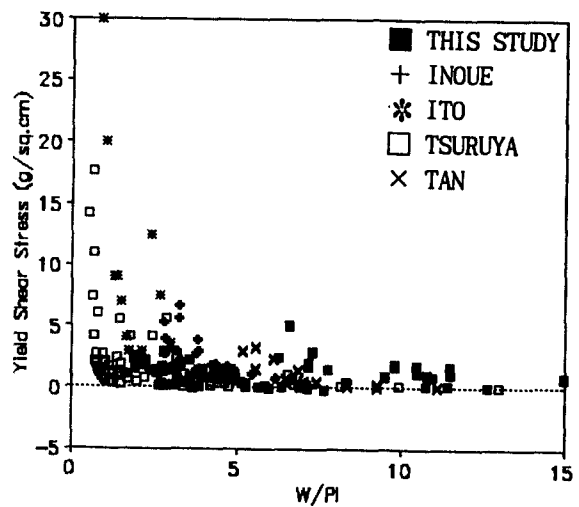
4.3 실험결과와 비교 분석

본 연구에서 개발한 관입시험기의 신뢰성을 확인하기 위해 기존의 연구자료를 이용하여 검증을 실시하였다. 검증에 인용된 기왕의 자료의 연구자와 각 연구대상 시료의 특성은 <표 4-2>에 나타난 바와 같다.

또 각 연구시료의 전단강도와 함수비의 관계를 액성한계로 정규화 한 관계는 (그림 4-11), 소성지수로 정규화한 것은 (그림 4-12)에 각각 나타냈다. 각각의 그림에서 알 수 있는 것은 액성한계의 2 배 정도에서 급격히 강도가 증가하고 있고 소성지수의 약 5 배 부근에서 강도가 급격히 증가하고 있음을 볼 수 있다. 이는 (그림 4-4) 및 (그림 4-5)와 같은 결과를 보이고 있다.



(그림 4-8) 액성한계로 정규화 한 기왕 자료의 전단강도-함수비 관계



(그림 4-9) 소성지수로 정규화 한 기왕 자료의 전단강도-함수비 관계

〈표 4-2〉 수역약점토의 전단강도 실험자료 ⁶⁾⁸⁾¹²⁾¹⁶⁾

TEST	RESEARCHER		INOUE ¹⁾		ITO ²⁾				TSURUYA ³⁾			TAN ⁴⁾	THIS STUDY ⁵⁾				
	SAMPLE		CSB	PTB	UMEDA	SENRI A	SENRI B	BENTO -NITE	KAOLI -NITE	BENTO -NITE	KUMA -MOTO		BNR3	ILSAN	GUNSAN	INCH -EON	KWANG -YANG
Gs			2.67	2.66	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.670	2.614		2.69	2.69	2.69	2.70	2.71
LL (%)			87	80	57.2	118.5	98.0	325.0	70.5	183.9	79.4	65	28.5	36.0	36.8	55.3	64.3
FINESS No (%)								274.5									
PL (%)			34	34	29.3	37.7	32.4	29.0	32.3	24.8	41.3	38	22.5	24.8	23.2	25.1	31.2
PI (%)			53	46	27.1	54.9	86.1	296.0	38.2	159.1	38.1	27	6.0	11.2	13.6	30.2	33.1
If (%)									17.8	39.6	17.4						
ACTIVITY												1.23					
U S C S			CH	CH	CH	CH	CH	CH	CH	CH	CH	CH	ML	ML	CL	CH	CH
SAND (%)			3	9					0	5.3	5.0		15.2	11.2	7.6	5.5	3.2
SILT (%)			46	40					100	94.7	95.0		84.8	88.8	92.4	94.5	96.8
CLAY (%)			51	51	4.6	43.0	56.9	73.0									
MAX. DIA d _{max} (mm)			0.6	1.18													
MED. DIA d ₅₀ (µm)									0.8	6.5	13.0						
ILLITE -SMECTITE			19.8	19.2													
ILLITE			17.8	9.3								10					
KAOLINITE			12.5	13.0								55					
CHLORIDE			9.2	9.9													
SMECTITE			6.6	10.5								35					
RESEARCH TECHNIQUE			1) ; VISCOMETER & THIN PLATE TEST (No OF DATA : 36) 2) ; VANE TEST (No OF DATA : 31) 3) ; VISCOMETER (No OF DATA : 90) 4) ; VISCOMETER (No OF DATA : 15) 5) ; THIN PLATE TEST (No OF DATA : 255)														

5 결론

준설패립 점토지반의 강도 및 압밀특성에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 강도시험으로는 본 연구를 위하여 특별히 연구 고안한 얇은 판과 스프링을 이용한 관입시험장치를 이용하였으며 압밀시험은 CRS 압밀시험을 이용하였다. 또 두 시험법의 신뢰도를 확인하기 위해 기존의 회전점도계 및 베인에 의한 강도 연구자료를 이용하였으며 또 표준압밀시험을 확장하여 실시하고 검증에 이용하였다. 이상과 같은 실험적 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출했다.

1. 준설패립과 같은 초연약 슬러리 점토의 강도시험법으로 정적 얇은 판 관입시험과 유동적 얇은 판 관입시험을 개발 제안했는데 두 시험법은 상당히 적합하고 있으며 또 기왕의 연구자료와도 근사하고 있어 그 신뢰도는 상당히 높다고 판단되며 장치나 해석이 간단하므로 실내 및 현장에서 쉽게 이용할 수 있는 시험법으로 실용화될 가능성이 있다.
2. 준설패립은 투기후 시간이 경과함에 따라 급격히 강도가 증가하는 경향을 보일 뿐만 아니라 함수비가 적어짐에 따라 강도는 현저히 커진다. 또 점토는 함수비가 액성한계의 약 두배, 소성지수의 약 다섯배 보다 적은 범위에서 강도가 급격히 증가하는 경향을 보이며 실트는 액성한계의 약 두배, 소성지수의 약 열배 보다 적은 범위에서 강도가 급격히 증가한다.
3. 준설패립의 유동적관입시험 결과, 관입속도가 빨라짐에 따라 전단응력은 커지는 경향을 보였다. 또 관입속도가 0.1~0.2 cm/min 근방을 경계로 하여 두개의 Bingham 모델로 설명할 수 있다. 그러므로 영변형율의 전단응력을 구하는데는 저관입속도의 범위를 선택하는 것이 바람직하다.
4. CRS 압밀시험은 단시간내에 소정의 압밀특성을 파악할 수 있을 뿐만 아니라 지금까지의 표준압밀로 적용이 불가능한 저응력 범위의 압밀이 가능하고 또 연속재하방식이므로 시료에 충격을 피할 수 있어 준설패립을 비롯한 고함수비의 초연약 점토의 압밀시험법으로 적합하다고 판단된다.
5. 회전 점도계를 이용하여 준설패립의 유동특성에 관한 연구를 계속할 계획이며 얇은 판 관입시험에 의한 연구를 병행하여 실제로 현장 및 실내시험법으로 사용할 수 있도록 보다 많은 자료를 축적하고 초연약 점토의 강도에 따른 분류 시스템을 제안할 계획이다.

참 고 문 헌

1. 이 승, 양태선, 박종찬, 백영식, 진공하중에 의한 Drain Board 타입 점토지반의 거동특성, 한국지반공학회지, 제 9 권, 제 1 호, 1993년 3월, PP 45-57
2. 이 승, 양태선, 박종찬, Drain Board 타입된 점토지반의 강도특성, 한국지반공학회 토목섬유위원회 학술발표집 제 2 집, 1993년 9월, PP 65-90
3. 정인준, 유건선, 준설토의 기본적인 실험연구, 대한토목학회지, 제 27 권, 제 5 호, 1979, PP 55-64
4. 梅原 靖文, 善 功企, 超軟弱粘土の壓密定數の決定法, 港灣技術研究所報告, 第 14 券, 第 4 號, 1975년 12월, PP 45-65
5. 伊藤富雄, 松井 保, 阿倍信晴, 超軟弱地盤の地盤パラメータについて, 第11回 土質工學研究發表會 1976, PP 315-318
6. 伊藤富雄, 松井 保, 粘土の流動機構に關する研究, 土木學會論文報告集 第 236 號 1975 PP 109-123
7. 土質工學會基準(日本) JSF T 412-1992 土の定ひずみ速度壓密試驗方法
8. 鶴谷 廣一, 中野 普, 鷹濱 潤, 回轉粘度計によりの底泥の流動特性の檢討, 鷹港灣技術研究報告書, 第566號, 1986년, PP 3- 29
9. ASTM 4189-89 One-dimensional consolidation properties of soils using controlled-strain loading
10. Crawford, C.B, Interpretation of the consolidation test, ASCE Vol.90 SEPT. 1964 PP 87-102
11. Head, K.H, Manual of soil laboratory testing, VOL.3, PP 1197-1225, 1985
12. Inoue, T, TAN, T.S, LEE, S.L, An investigation of shear strength of slurry clay, S&F, VOL.30, NO.4 DEC.1990, PP 1-10
13. Lee, S.L, Karunratine, G.P, Yong, K.Y & Ganeshan, V, Layered clay-sand scheme of land reclamation, ASCE, VOL 113, NO 9, PP 984-995
14. Moore, F, Davies, L.J, A new rotational viscometer and some preliminary results, Transaction of the British ceramic society Vol.55 1956 pp 313-325
15. Smith, R.E, Wahls, H.E, Consolidation under constant rates of strain ASCE VOL.95, NO. SM 2 MAR. 1969. PP. 519-539
16. Tan, T.S, Yong, K.Y, Leong, E.C, Lee, S.L, Behaviour of clay slurry, S&F, VOL.30, NO.4, DEC.1990, PP 105-118
17. Tanner R.I. Engineering Rheology, 1985, Clarendon Press, Oxford PP 10-15
18. Umehara, Y, Zen, K, Constant rate of strain consolidation for very soft clayey soils S&F VOL.20 NO.2 JUN, 1980 PP 79-95
19. Wissa, A.E.Z, Christian, J.T, Davis, E.H, Heiberg, S, Consolidation at constant rate of strain ASCE VOL.97, No. SM10 OCT. 1971. PP. 1393-1413