

# 준설 연약 점토의 전단강도 특성에 관한 연구

A Study on Strength Characteristics of Dredged Soft Clay

이 송\*1  
Lee, Song  
윤 돈 규\*2  
Yun, Don - Kyu  
백 영 식\*3  
Paik, Young - Shik

---

## Abstract

In this paper, the experimental study on the behavior of the dredged clay was performed by introducing the consolidation test method using continuous loading. Also a new testing method was examined and the strength of the dredged clay using thin plate was evaluated. The rheological characteristics of the dredged clay are described by the Bingham model.

The static and rheologic thin plate penetration test is proposed for the shear strength testing method. It is found that both of testing methods are reasonable and have a practicality. Especially, the strength increases for a water content which is less than two times of liquid limit in case of silty soil and clayey soil. About plasticity index, the strength increases rapidly for a value - less than 10 for silt, 5 for clay - which a water content is normalized by plasticity index of silty soil rather than clayey soil.

## 요 지

본 논문에서는 연속재하압밀시험을 적용하여 준설토의 거동을 연구하고 얇은 판을 이용하여 준설토의 강도 시험을 실시하는 새로운 실험 방법을 고안하여 실험을 하였다. 이 경우 준설토의 유동적 특성은 Bingham 모델로 설명할 수 있다.

이러한 방법을 위하여 정적 관입시험과 유동적 관입시험을 실시하였는데 두 방법은 모두 합리적이고 실용성이 있었다. 특히 실험을 통하여 얻은 결론에 따르면 점토질이 많은 흙이나 실트질 흙 모두에 대해서 함수비가 액성한계의 두배보다 적어지면 강도가 급격히 증가하는 반면, 소성지수의 경우 소성지수로 정규화한 함수비값이 실트는 10, 점토는 5이하가 되면서 소성지수로 정규화한 함수비값의 강도가 급격히 증가함을 알 수 있었다.

---

\*1정회원, 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 부교수

\*2정회원, 동경공업대학교 대학원 지반환경전공

\*3정회원, 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수

## 1. 서 론

준설 점토는 함수비가 높아 거의 유체와 같은 거동을 보이고 큰 변형을 동반하기 때문에 종래의 토질 역학적 관념으로는 해석이 어려우므로 새로운 접근 기법을 개발해야 한다. 이러한 점토의 압밀 및 강도 특성에 관한 연구는 최근 활발히 진행되고 있으나 그 연구 정도는 미비하므로 이러한 지반에 대한 전단 강도와 압밀침하 문제를 설계에 반영하는데 많은 어려움을 겪게 된다.

지금까지의 강도 시험법으로는 베인 시험기나 회전식 점도계를 이용한 방법이 가장 실질적인 강도를 구할 수 있는 것으로 알려져 있다. 회전 점도계를 이용한 연구로는 Inoue, Tan과 Lee<sup>10)</sup>, 鶴谷, 中野 & 鷹濱<sup>6)</sup>, Tan, Young, Leong & Lee<sup>4)</sup> 등 여러 연구자에 의해 적용 가능성이 이미 증명되었다. 또 베인 시험기를 이용하여 초연약점토의 강도를 측정하는 방법은 伊藤<sup>4)</sup> 등에 의해 가능성이 확인되었다. 그러나 Inoue, Tan & Lee<sup>10)</sup>는 두 가지 시험법에 문제가 있음을 시사하면서 강도를 직접 구하는 방법을 제안하였는데 얇은 판을 이용, 직접 관입 시험을 실시하여 강도를 구하고 회전 점도계 시험의 강도와 비교하여 그 가능성을 검토하였다.<sup>5, 8, 12, 16)</sup> 伊藤, 松井 & 阿倍<sup>4)</sup>는 초연약 지반에 Bingham 소성체 모델을 적용하여 항복전단응력 및 소성점도를 구하고 종래의 강도 정수인 점착력과 내부마찰각을 대신하여 이들을 새로운 지반 정수로 이용하여 전단 거동을 예측하는 것이 합리적이라고 제안하고, 함수비와 액성한계의 비가 2.0 근방에서 강도 특성의 경계점이 존재함을 시사하였고 Inoue, Tan & Lee는 이 점을 슬러리 한계(slurry limit)라 명명했다. 초연약 준설 점토는 시간 종속적 변형 특성을 보이며 광범위한 연경도 상태에 따라 전단 특성은 매우 상이한 거동을 보인다. 이런 다양한 전단 특성을 계통적으로 취급하는 접근 방법으로 역학 모델을 들 수 있다. 본래 준설 점토는 고함수비의 초연약점토로서 유체

처럼 거동하고 전단응력은 변형 속도에 의해 지배되고, 실용적인 면에서 볼 때 영변형률(zero strain rate)에서의 전단응력, 즉 항복전단응력 또는 전단 강도는 중요하지만 직접 구하기 어려운 정수이다. 따라서 준설 점토의 유동 특성을 아는 것은 대단히 중요하며 유동 모델(rheologic model)을 이용하여 강도를 추정하는 방법을 이용하여야 한다.<sup>6, 12)</sup> Terzaghi의 일차원 압밀이론 및 표준압밀시험법을 초연약 점토에 적용하는데는 이론적, 실험적 한계가 있다. 총두께의 변화를 고려한 유한변형이론에는 三笠 및 Gibson, England & Hussey 등의 이론이 있으며, 누출현상 및 저응력 영역에 대해서는 대단히 적은 응력 혹은 변위를 연속재하 하는 시험법을 이용함으로써 측정 정도를 높일 수 있다.

그 제어 방식에 따라 일정하중률 압밀시험법, 일정변형률 압밀시험법, 일정동수구배 압밀시험법이 있으며 이들 시험법중 어느 것이 최적의 방법인가는 사용목적에 따라 다르지만 梅原<sup>2)</sup>는 실험적 연구를 통해 일정 변형률 압밀 시험법이 저응력 영역을 포함할 수 있으므로 초연약 점토의 압밀시험으로 적당하다는 사실을 밝혔다.<sup>4)</sup>

따라서 본 연구에서는 준설매립 점토지반을 대상으로 하여 유동학적 특성을 고려한 강도 시험과 연속재하방식을 이용한 압밀시험을 실시하여 준설 매립 점토지반의 거동을 규명하고 준설 점토의 취급에 필요한 설계 자료를 제시하는데 그 목적이 있다.

전단 강도는 특별히 고안하여 개발한 얇은 판 관입시험기를 이용하였다. 얇은 판과 스프링을 이용하여 하중을 정적으로 재하하여 관입시키고 그때의 전단 강도를 구하는 정적 관입 시험기와 관입속도를 조절할 수 있는 유동적 관입시험기의 두 가지를 이용하여 준설 점토의 강도를 직접 및 유동 모델로 추정하는 방식을 취하였다. 또한, 본 연구에서 개발, 이용한 강도 시험 장치의 신뢰성을 입증하기 위해 본 연구에서 얻은 결과를 기존의 초연약점토의 강도

시험 결과와 비교, 검증하였다. 또, 압밀진행에 따른 강도 특성의 변화를 관찰하여 슬러리 점토의 간극비-강도 관계를 제시하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 준설 점토의 전단특성

흙의 전단 강도를 구하는 실내시험 방법에는 직접전단시험, 일축압축시험 및 삼축압축시험 등이 있다. 그런데, 초연약 점성토의 전단 강도는 점착력과 내부마찰각을 명확히 분리하는 것이 어렵다. 그리고 시간 종속적 비뉴톤 유체적 거동을 하므로 전단 강도는 변형 속도에 의해 지배된다. 대체적으로 변형 속도가 커짐에 따라 전단 강도는 커지게 되는데 이 관계는 유동학적 모델로 설명할 수 있다.<sup>4, 6, 10, 15)</sup>

초연약 점토에 대해서는 종래의 전단 강도 시험법으로는 강도 측정이 불가능하므로 현재 배인 시험기와 회전 점도계를 이용한 방법이 이용되고 있다. 배인 시험기는 배인의 날개를 직경으로 하는 원통을 전단면으로 가정하여 해석하는데, 초연약 상태에서는 원통형의 전단면이 형성되지 않을 뿐만 아니라 전단면의 추정도 대단히 어려워 실험 결과의 이용에 상당한 주의를 필요로 하고 실험조건을 반드시 고려해야 한다. 회전 점도계를 이용하는 방법은 현탁액 혹은 슬러리 상태의 강도를 측정하는 방법 중에서 가장 합리적인 시험법으로 알려져 있다. 그러나 점토의 유동특성의 가정과 변형 속도의 제어 방법에 따라 강도가 크게 달라지는 점에 유의해야 하고, 장치가 정교하므로 자동 제어 및 기록 장치가 없으면 정도를 유지하기가 어렵다. 따라서 고가의 부수 장치가 필요하므로 실용적으로 사용되지 못하고 있는 실정이다.

준설 점토의 강도는 슬러리상태이므로 변형 속도가 영일 때의 강도이다. 따라서 유동학적 모델을 이용하여 영변형률의 전단 강도를 추정하게 되는데 모델과 실험시 변형 속도의 범위

에 따라 다른 전단 강도를 추정하게 된다. 따라서 이 방법의 적용에 있어서 준설 점토의 레올로지를 알아야 한다.<sup>6)</sup>

통상 비뉴톤 유체는 전단응력과 전단변형률의 관계가 비선형이라고 본다. 즉, 비뉴톤 유체의 점도는 온도나 압력에 따라 일정하지 않으며 변형 속도에 지배된다. 이런 비뉴톤 유체의 전단 거동에 대해서 시간 독립적 유체, 시간 종속적 유체, 점탄성 유체의 세 부류로 나뉘어진다. 준설 점토는 시간 종속적인 성격이 강하지만 일정 시간이 경과하여 압밀되면 점, 탄성적인 면이 부각된다. 시간 종속적 유체의 해석은 대단히 어려우므로 실용상 시간 독립적 유체로 단순화시켜 아래에 있는 식(2-1)의 관계로 해석한다.<sup>5, 8, 12)</sup>

$$\tau = f(\dot{\epsilon}) \quad (2-1)$$

여기서,  $\tau$ 는 변형속도,  $\dot{\epsilon}$ 는 전단응력이다. 식(2-1)을 보다 구체화시켜 보면 그림 2.1의 4종류로 구분할 수 있다. Bingham 소성체의 대표적인 모델식은 1929년 Bingham에 의해 식(2-2)와 같이 제안되었다.

$$\tau = \tau_y + \eta_p \dot{\epsilon} \quad (2-2)$$

여기서  $\tau_y$ 는 항복 전단응력이며,  $\eta_p$ 는 소성점도이고  $\dot{\epsilon}$ 는 전단변형 속도이다. 의사소성 유체는 Waele과 Ostwald를 비롯하여 여러 사람이 서로 다른 모델식을 제시하였으나 그중 대표적인 모델은 다음의 식(2-3)과 같이 표현되며, 멱승측모델(power law model)이라 불린다.

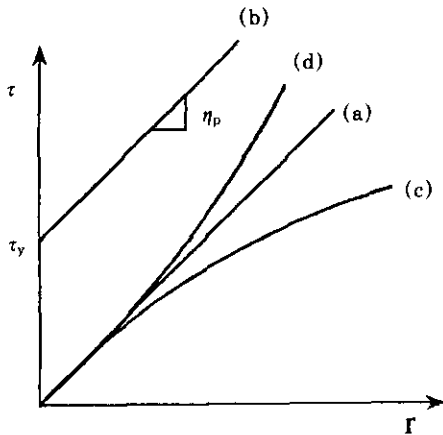
$$\tau = k \dot{\epsilon}^n \quad (2-3)$$

여기서,  $k, n$ 은 재료에 따른 상수이다.

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

슬러리 점토에 대해 회전 점도계를 이용한 전단특성에 관한 실험적 연구로 전단변형 속도가 적은 영역에서 Bingham 모델을 적용함이 합리적이며 속도가 빨라짐에 따라 멱승측 모델로 설명된다고 알려져 있다.

### 2.2 얇은 판 관입이론



- (a) 뉴턴 유체
- (b) Bingham 소성체
- (c) 의사소성 유체
- (d) 팽창성 유체

그림 2.1 전단응력과 전단변형률의 관계

본 연구에서는 새로운 시험방법을 개발하여 그림 2.2 및 그림 2.3에 그 개념도를 제시했다. 얇은 판을 슬러리 상태의 시료에 관입하면 저항력이 발생하게 된다. 이때 저항력은 판의 주면을 따라 발생하는 전단력(drag force)과 관입된 체적으로 유발되는 부력으로 이루어진다고 보고 평형 조건을 고려하여 전단강도를 구

하는 방법을 생각하였다.

그림 2.2는 정적 얇은 판 관입시험 장치인데 재하용기에 하중  $dw$ 를 재하하면  $dh$ 만큼의 관입이 유발되고 이때 관입량은 용수철 가운데 설치한 변위계로 측정하게 된다. 즉, 이때 그림에 제시한 힘 이외의 힘은 없다고 가정한다. 하중  $dw$ 로 인한 힘의 평형에 이르면 판의 관입은 중단되며 평형 방정식은 다음과 같다.

$$dw = k dh + 2(d+t)dh \cdot \tau_y + t \cdot d \cdot dh \cdot \gamma_c \quad (2-4)$$

여기서,  $k$ 는 스프링 상수,  $dw$ 는 하중,  $\tau_y$ 는 항복전단강도,  $d$ 는 판의 폭,  $t$ 는 판의 두께,  $dh$ 는 관입 깊이이고  $\gamma_c$ 는 점토의 단위 중량이다. 식 (2-4)를 전단 강도에 대해 정리하면 식(2-5)와 같다.

$$\tau_y = \frac{dw/dh - k - t \cdot d \cdot \gamma_c}{2(d+t)} \quad (2-5)$$

하중-관입량 그래프에서 기울기를 구하면  $dw/dh$ 가 되고 이것을 식(2-5)에 대입하면  $\tau_y$ 를 간단히 구할 수 있다.

그림 2.3은 유동적 얇은 판 관입시험장치를 설명하는 그림으로서 그림 2.2와 개념은 동일하지만 하중을 재하하는 대신 재하장치를 이용하여 속도를 조정하면서 관입시킨다. 그때 평형 방정식을 고려하면 그림 2.2에 제시한 바와

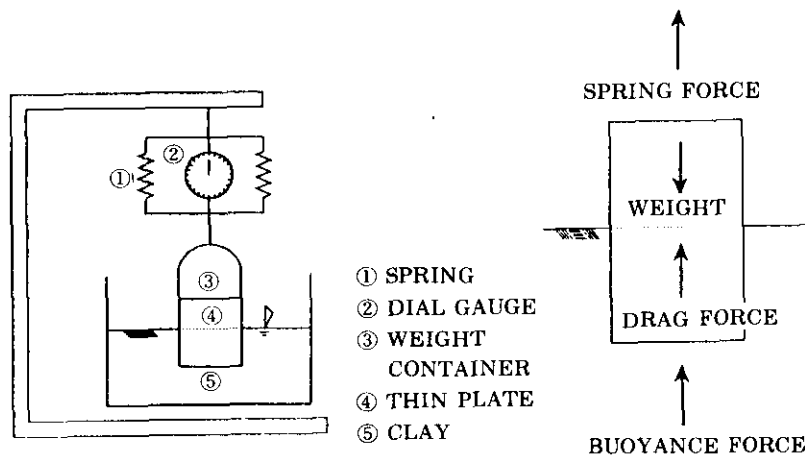


그림 2.2 정적 얇은 판 관입시험 장치 개요도

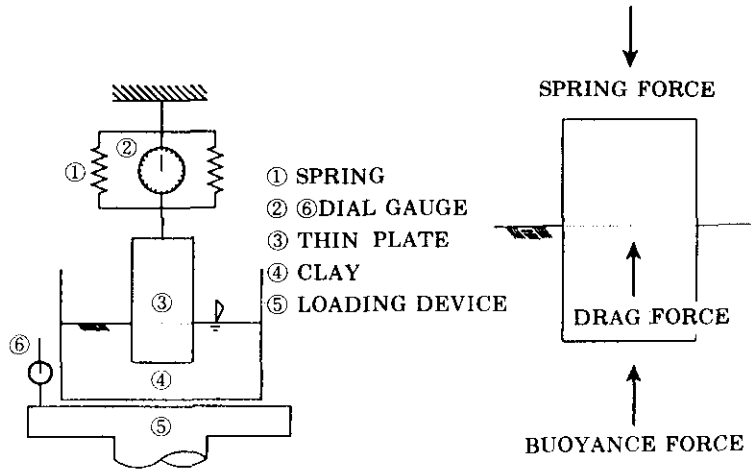


그림2.3 유동적 얇은 판 관입시험 장치 개요도

유사하지만 정적 평형 상태가 아니므로 전단응력은 항복 전단응력보다는 큰 전단응력이 발휘되는데 이 전단응력을  $\tau$ 라 하면 식(2-6)과 같은 평형방정식이 구성된다.

$$k dx = 2(d+t) dh \tau + t d dh \gamma_c \quad (2-6)$$

여기서  $dx$ 는 스프링의 수축량이고  $dh$ 는 관입깊이이다. 식(2-6)을  $\tau$ 에 대해 정리하면 식(2-7)과 같다.

$$\tau = \frac{kdx/dh - t \cdot d \cdot \gamma_c}{2(d+t)} \quad (2-7)$$

식(2-7)에서 구한 전단응력과 관입속도와 관계도를 도출하고 적절한 모델식을 이용하거나, 얻어진 자료를 회귀 분석하여 영변형률에서의 전단응력 즉, 전단 강도를 구하면 된다.

### 3. 실험 장치 및 방법

#### 3.1 시료의 선정

시료는 일산, 인천, 군산, 여수, 광양 등 우리나라 서·남해안 지역에서 채취된 해상 퇴적점토이다. 시료에는 조개 껍질을 비롯한 각종의 불순물 및 유기물질이 혼합되어 있으므로

자연 건조시킨 후 #40 체로 체가름하여 통과된 시료를 사용하여 실험을 하였다. 또한 각 시료의 토질 정수는 표.1에 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	

#### 3.2 실험장치

얇은 판 관입시험장치는 그림2.2 및 그림2.3에 개요도를 나타내었다. 그림2.2의 경우에 재하통에 하중을 정적으로 재하하고 평형상태에 이르면 스프링 사이로 변위계로 관입된 깊이를 측정하도록 하였다. 그림2.3은 변형속도  $r$ 로 관입시키면 스프링에 부의 하중이 걸리게 되고 스프링의 수축량과 재하장치의 이동량을 각각

두개의 변위로 측정하여 관입깊이 및 관입하중을 계산했다. 길이  $h=200\text{cm}$ , 폭  $d=50\text{mm}$ , 두께  $t=2\text{mm}$ 의 얇은 판을 이용했다.

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

### 3.3 실험방법

투명한 플라스틱 시료 용기에 각 시료를 5~6가지의 서로 다른 함수비로 조정하여 하루 이상 수침 시킨 후 프로펠러 교반기를 이용하여 충분히 교반하고 즉시 그림 2.2의 정적 관입 시험을 실시하였다. 그림 2.2와 같이 시료를 설치하고 관입장치를 시료에 얇은 판이 약간 관입될 정도로 높이를 조정하였다. 영 읽음값을 기록하고 재하용기에 핀셋을 이용하여 충격을 최소화할 수 있도록 하중을 재하하였다. 재하 후 판의 관입을 변위계를 통해 관찰하고 관입이 종료되면 평형 상태에 도달한 것으로 가정하여 하중 및 관입량을 기록하고 같은 방법으로 5~6단계 반복하였다. 하중  $dw$ 와 관입량  $dh$ 의 관계는 선형관계를 나타내고 이 때의 기울기를 구하면  $dw/dh$ 가 되고 식(2-5)로 전단 강도를 구할 수 있다.

정적 관입시험이 종료되면 3일간 방치한 후 유동적관입시험을 실시하였다. 이 관입시험은 그림 2.3의 장치를 이용하여 재하대위에 시료를 설치하고 관입장치를 시료에 얇은 판이 약간 관입될 정도로 높이를 조정한다. 영 읽음을 하고  $0.02\text{cm}/\text{min}$ 의 속도로 관입을 실시한다. 이때 시간과 두개의 변위계를 1분 간격으로 5분간 읽는다. 계속해서  $0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9\text{cm}/\text{min}$ 의 속도로 관입시험을 실시하고 읽음 값을 이용하여 스프링 수축량  $dx$ 와 관입량  $dh$ 를 계산하고  $dx/dh$ 의 관계로부터  $dx/dh$ 를 구하고 식(2-7)을 이용하여 각 관입속도에 대해  $\tau$ 를 구한다.

또 각 데이터를 취합하여 전단응력-관입속도의 관계로부터 절편을 구하면 이것이 영변형률의 전단응력이 된다. 정적 및 유동적 관입 시험이 종료되면 다시 방치하여 5일 경과후 같은 방법으로 관입시험을 실시하였다.

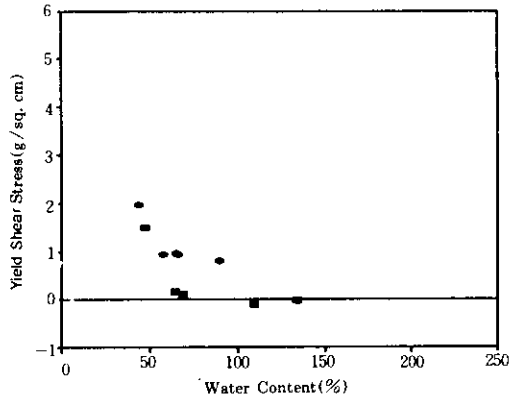
CRS 압밀시험기에 시료와 물을 넣고 충분히 교반시켜 준설 투기후 초기 슬러리 상태를 재현하도록 하였다. 슬러리 상태의 점토 시료의 제작이 끝나면 즉시 정적관입시험을 실시하여 초기상태의 전단 강도를 구하였다. 압밀속도는 시료의 토질 정수를 고려하여 선택하고 과잉 간극수압비( $U_b/\sigma$ )가 30%를 넘지 않고 시료의 누출 현상이 발생하지 않는 속도로 조정하여 CRS 압밀시험을 실시하였다. 시험시작 전에 영 읽음을 하고 시험이 시작되면 시간, 변위, 하중계를 최초 10분간은 매 1분, 그 이후는 매 5분마다 읽었다. 압밀이 진행됨에 따라 약 1시간마다 제하를 실시하는데 압밀속도와 같은 속도로 변형시켰다. 제하가 종료되면 재하판을 제거하고 정적 및 유동적 판 관입시험을 실시한 후 이어서 압밀시험을 계속하였다. 직경에 비해 2mm 판은 얇다고 볼 수 있으므로 관입에 의한 시료의 교란 및 기타 영향은 무시했다. 압밀하중은 약  $5\text{kg}/\text{cm}^2$ 까지 재하하고 시험을 종료하였다. 시험이 종료되면 관입시험을 실시하고 최종 단계의 강도를 측정하였다.

준설 점토의 시간 효과 및 함수비 변화에 따른 강도 변화를 관찰하기 위한 실험으로 각 시료를 액성한계의 1~4배 범위의 함수비로 조정하여 각각 시료당 5개의 서로 다른 함수비로 총 25개의 플라스틱 용기에 시료와 물을 넣고 1일 이상 경과하면 충분히 교반시킨 후 정적 관입시험을 실시하고 시간이 경과함에 따라 정적 및 유동적 관입시험을 실시한다.

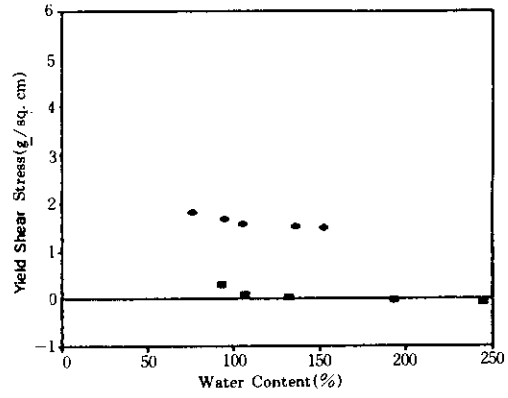
## 4. 실험 결과의 고찰 및 분석

### 4.1 얇은 판 관입시험 결과의 고찰

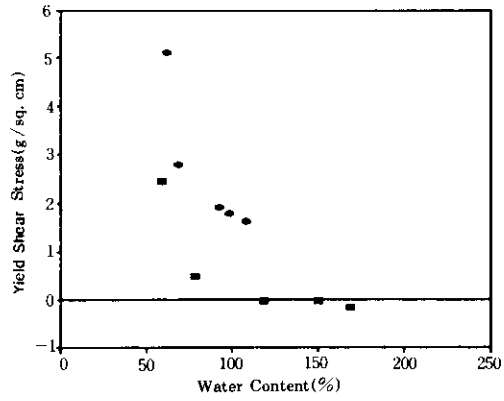
일산, 군산, 인천, 광양, 여수의 5개 시료에



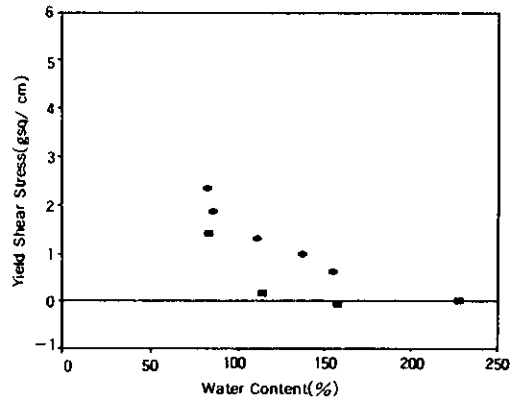
(a) 일산



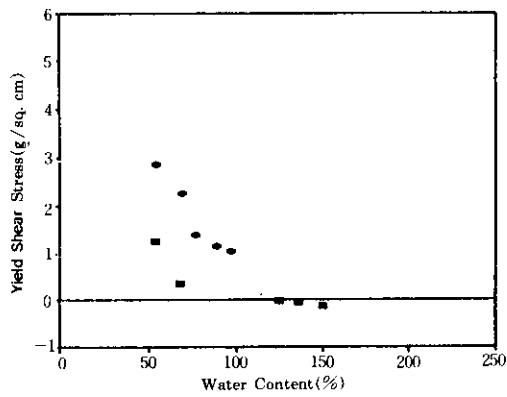
(d) 광양



(b) 군산



(e) 여수

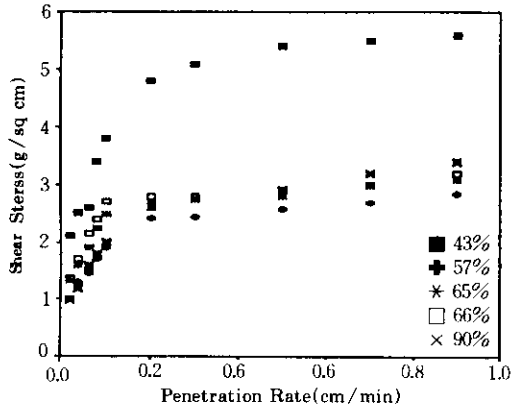


(c) 인천

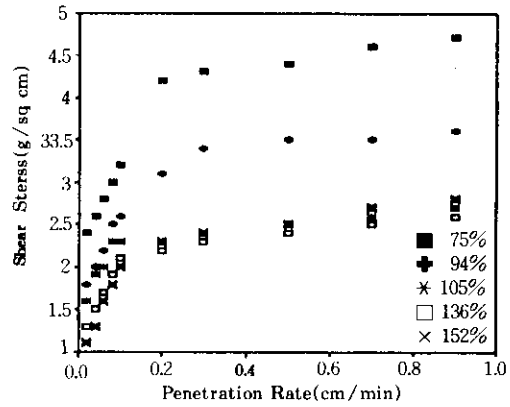
■ 0日 + 3日

SAMPLE	액성한계(%)	소성지수(%)
일산	28.5	6.0
군산	36.0	11.2
인천	36.8	13.6
광양	55.3	30.2
여수	64.3	33.1

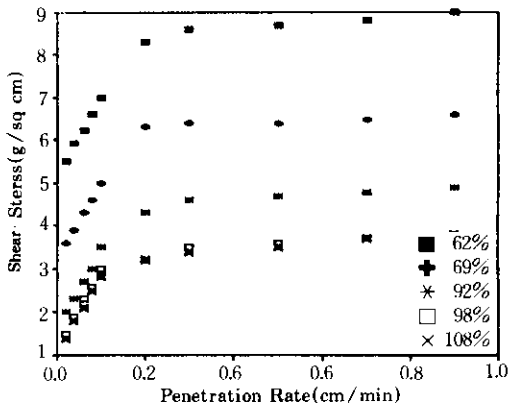
그림 4.1 각 시료의 정적 관입시험 결과



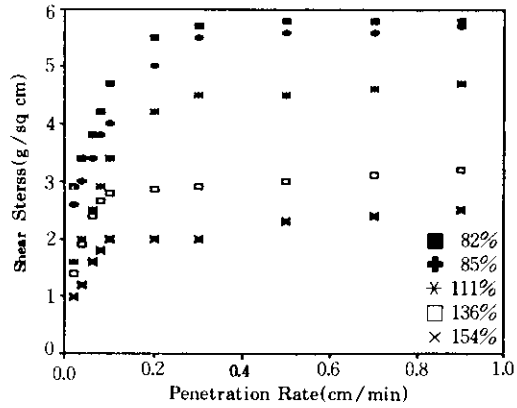
(a) 山



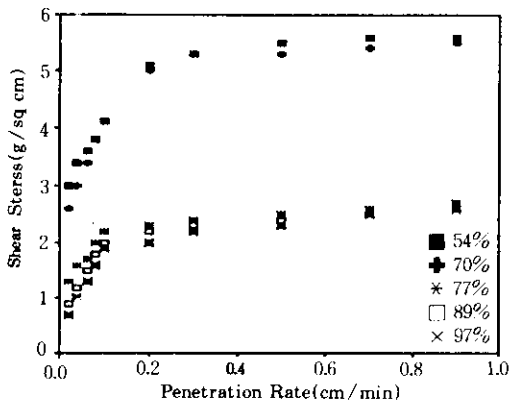
(d) 光陽



(b) 群山



(e) 麗水



(c) 仁川

그림 4.2 각 시료의 유동곡선도

대해 정적 및 유동적 관입시험을 실시하였다. 각 시료에 대해 초기함수비를 액성한계의 1~4 배로 조정하여 총 5단계로 나누어 플라스틱 용기에 교반한 직후와 3일 경과후 각각 정적 관입시험을 실시하여 전단 강도와 함수비의 관계를 그림 4.1에 나타내었다.

시료를 초기함수비로 충분히 교반한 후 즉시 관입시험을 했을 때 함수비가 커짐에 따라 전단 강도는 음의 값을 나타내는 경향이 보이고 있다. 이는 초기의 고함수비 상태에서는 침강 현상이 발생하므로 하향력이 발생한 것으로 판



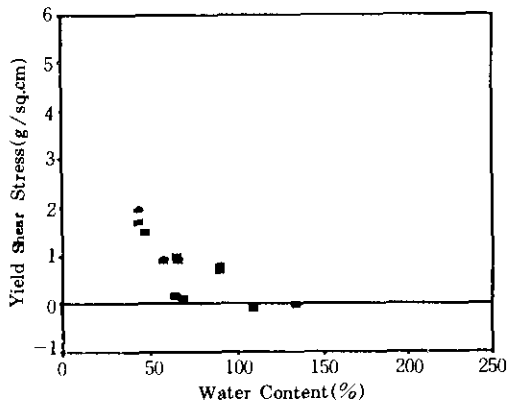
단된다. 또 시간이 경과함에 따라 강도는 커지고 있으며 함수비가 일산은 약 50%, 군산은 약 65%, 인천은 약 60%, 광양은 약 90%, 여수는 약 100%를 경계로 함수비가 감소할수록 강도는 급격히 커지는 경향을 보였다.

각 시료에 대해 3일 경과후 유동적 관입시험 결과를 관입속도와 전단응력의 관계로 그림4.2에 도시하였다. 또 결과그래프의 내용을 요약하여 표4.1에 나타내었다. 그림4.2를 보면 대략 관입속도 0.1~0.2cm/min을 경계로 하여 저

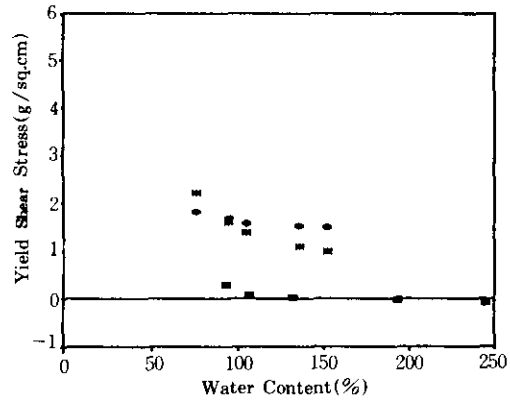
관입속도 영역과 고 관입속도 영역으로 나누어 두개의 선형식으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 이때의 두 선형식은 다음에 제시된 식(4-1) 및 (4-2)로 나타낼 수 있으며 각 측정치를 회귀 분석하여 구체적으로 각 상수를 구하여 정리하면 표4.1과 같다. 식(4-1)과 식(4-2)는 Bingham 모델이며 유동적 얇은 관입시험 결과로부터 각 대상시료는 두개의 Bingham 소성체 거동을 한다는 사실을 알 수 있다.

표 4.1 각 시료의 유동적 관입시험 결과

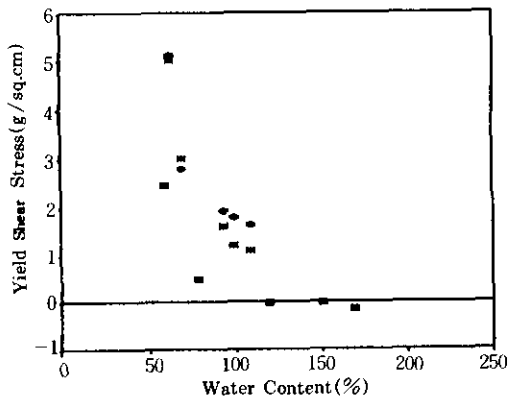
SAMPLE	W(%)	$\tau_{y1}(g/cm^2)$	$\eta_{p1}(gmin/cm)$	$\tau_{y2}(g/cm^2)$	$\eta_{p2}(gmin/cm)$	$r_0(cm/min)$
일 산	43	1.706	19.51	4.925	0.833	0.15
	57	0.926	9.53	2.251	0.633	0.17
	65	1.002	15.50	2.512	0.613	0.15
	66	0.946	19.25	2.643	0.503	0.08
	90	0.726	13.35	2.643	0.842	0.09
여 수	82	2.503	21.74	5.713	0.135	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
인 천	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
광 양	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
군 산	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



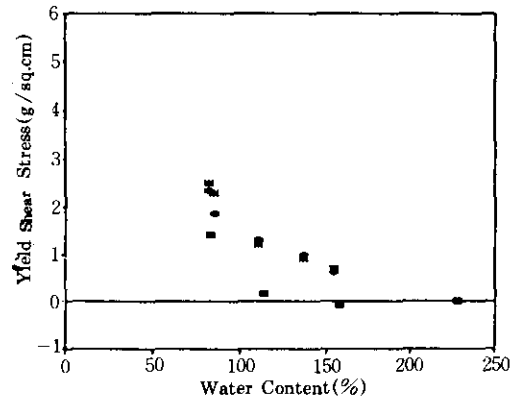
(a) 山



(d) 光陽

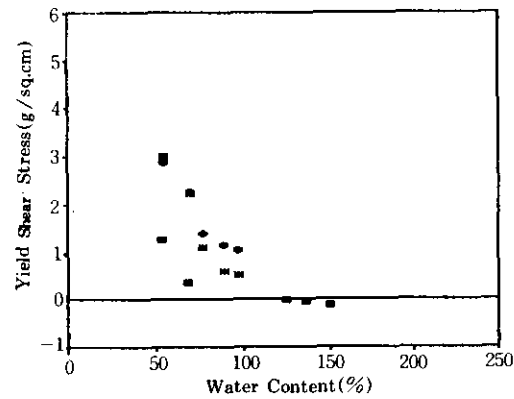


(b) 群山



(e) 麗水

■ 0日 + 3日    ※ 3日(流動)



(c) 仁川

그림4.3 각 시료의 정적 및 유동적 관입시험 결과

저관입속도시

$$\tau_1 = \tau_{y1} + \eta_{p1} \gamma \quad (\gamma \leq \gamma_0) \quad (4-1)$$

고관입속도시

$$\tau_2 = \tau_{y2} + \eta_{p2} \gamma \quad (\gamma \leq \gamma_0) \quad (4-2)$$

여기서,  $\tau_1, \tau_2$ 는 전단강도  $\tau_{y1}, \tau_{y2}$ 는 영관입속도에서 전단강도  $\eta_{p1}, \eta_{p2}$ 는 소성점도,  $\gamma$ 는 관입속도,  $\gamma_0$ 는 영관입속도이다.

표4.1로부터 시험시 채택한 관입속도에 따라

영 관입속도에서의 전단응력은 다소 큰 차이를 보인다는 것이다. 즉 고 관입속도에서 얻은 전단 강도는 저 관입속도에서 얻은 전단 강도에 비해 대단히 큰 값이다. 이 사실은 실험을 할 때 어떤 속도를 이용하는가는 대단히 중요한 인자라는 사실을 시사하고 있으며 유동적 관입 시험에 있어서 관입속도의 선정시 대상 시료의 유동적 특성을 잘 알아야 함을 확인할 수 있다. 이미 서론에서 강조한 바와 같이 영 변형 속도에서의 전단응력이 중요하므로 본 연구에서는 저 관입속도 영역에서 얻어진  $\tau_y$ 를 이 시료의 전단 강도로 취하였다.

그림4.3은 유동적 관입시험 결과로 구한 전단강도값을 그림4.1에 중복시켜 그린 것이다. 여기서 알 수 있는 것은 정적 관입시험에 의한 전단 강도보다 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 함수비에 따른 강도 특성을 비교하기 위해 그림4.4에는 액성한계로 정규화한 함수비에 대해 강도특성을 도시하였으며 그림4.5는 소성지수로 정규화하여 나타내었다. 그림4.4에서 알 수 있는 것처럼 5가지 시료 모두가 대체적으로 액성한계

의 약 2배보다 적은 함수비에서 강도가 급격히 증가하고 있다. 소성지수의 영향은 그림 4.5에 제시되어 있는 것처럼 여수, 인천, 광양 시료는 소성지수의 약 5배, 일산, 군산 시료는 소성지수의 약 10배보다 적은 함수비에서 강도가 급격히 증가하는 특성을 보이고 있다.

함수비에 따른 강도특성을 요약하면 점토시료는 액성한계의 약 2배 혹은 소성지수의 약 5 배, 실트 시료는 액성한계의 약 2배 소성지수의 약 10배를 경계로하여 이 경계점보다 적은 함수비에서는 강도가 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다.

그리고 정변형률 압밀시험을 실시하는 과정에서 얇은 판 관입시험에 의한 강도시험을 병행하였다. 그 결과를 간극비-강도사이의 관계로 도시하여 그림 4.6에 나타내었는데 그림 4.3과 유사한 경향을 보이고 있다.

#### 4.2 실험 결과의 비교 분석

본 연구에서 개발한 관입시험기의 신뢰성을 확인하기 위해 기존의 연구자료를 이용하여 검증 실시 하였다. 검증에 인용된 기왕의 자료의 연구자와 각 연구대상 시료의 특성은 표 4.2에 나타낸 바와 같다.

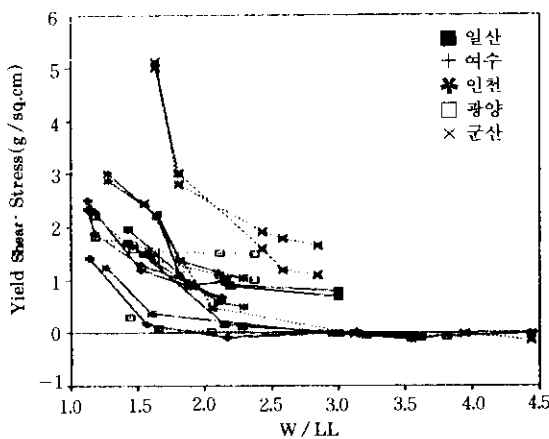


그림4.4 액성한계로 정규화한 각 시료의 관입시험 결과

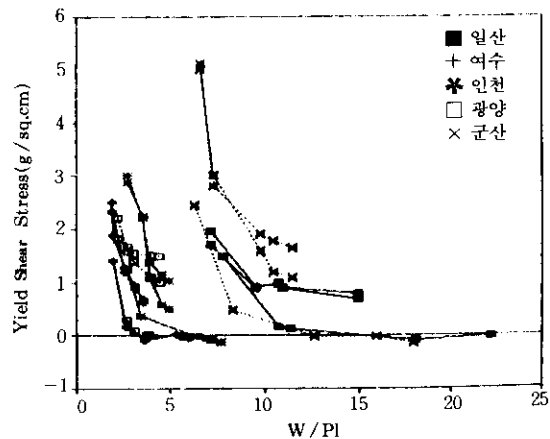


그림4.5 소성지수로 정규화한 각 시료의 관입시험 결과

표 4.2 초연아 점토의 전단강도 실험자료

TEST	RESEARCHER SAMPLE		INOUE <sup>1)</sup>		ITO <sup>2)</sup>				TSURUYA <sup>3)</sup>			TAN <sup>4)</sup>				THIS STUDY <sup>5)</sup>			
	CSB	PTB	UMEDA	SENRI A	SENRI B	BENTO NITE	KAOLI NITE	BENTO NITE	KUMA MOTO	BNR3	ILSAN	GUN SAN	INCH EON	KWANG YANG	YEOSU				
	2.67	2.66	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.697		2.69	2.69	2.70	2.71					
	87	80	57.2	92.6	118.5	325.0	70.5	183.9	79.4	65	28.5	36.0	36.8	64.3					
				76.9	98.0	274.5													
CONSLISTENCY	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				
	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				
							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				
COMP	3	9					0	5.3	5.0		15.2	11.2	7.6	5.5	3.2				
OSIT	46	40					100	94.7	95.0		84.8	88.8	92.4	94.5	96.8				
ION	51	51	4.6	43.0	56.9	73.0													
MAX. DIA d <sub>max</sub> (mm)	0.6	1.18					0.8	6.5	13.0										
MED. DIA d <sub>50</sub> ( $\mu$ m)																			
ILLITESMECTITE	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)																		

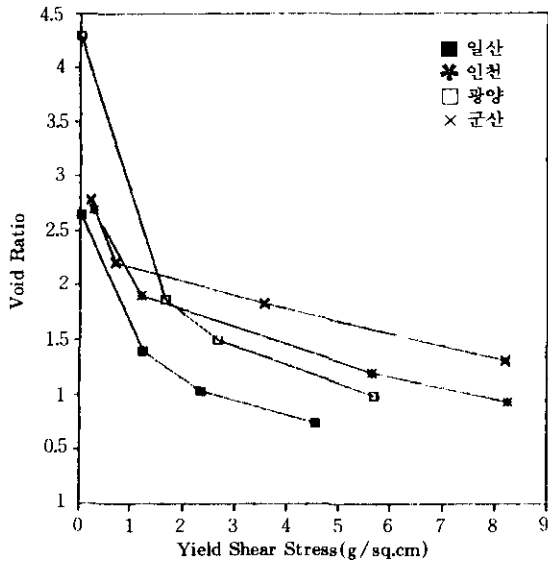


그림4.6 각 시료의 간극비 - 강도 관계

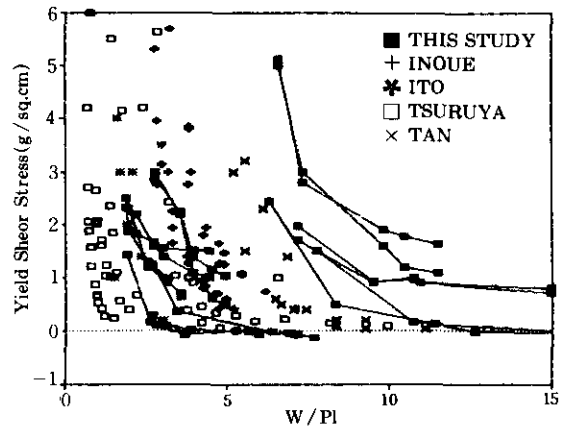


그림4.8 소성지수로 정규화한 기왕자료의 전단강도 - 함수비 관계

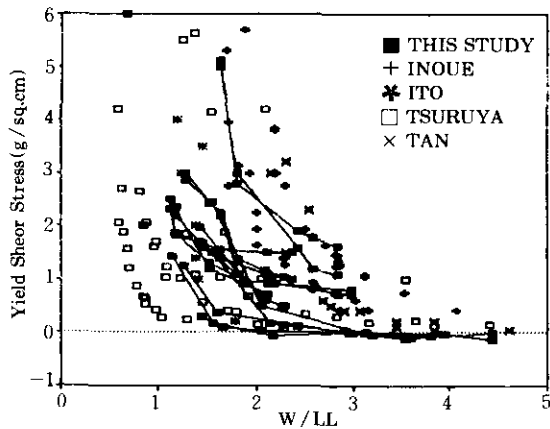


그림4.7 액성한계로 정규화한 기왕자료의 전단강도 - 함수비 관계

또 각 연구시료의 전단강도와 함수비의 관계를 액성한계로 정규화한 관계는 그림 4.7, 소성지수로 정규화한 것은 그림 4.8에 각각 나타냈다. 각각의 그림에서 알 수 있는 것은 액성한계의 2배 정도에서 급격히 강도가 증가하고 있고 소성지수의 약 5배 부근에서 강도가 급격히 증가하고 있음을 볼 수 있다. 이는 그림4.4 및 그림4.5와 같은 결과를 보이고 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 준설 매립 점토 지반의 강도 특성에 관한 실험적 연구를 하였으며 특히 본 연구를 위하여 고안한 얇은 판 관입스프링을 이용한 관입시험장치를 이용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 준설 점토의 강도 시험법으로 정적 얇은 판 관입시험과 유동적 얇은 판 관입시험은 그 적합성이 확인되었고 시험 결과도 기존 연구자료와 근사하므로 신뢰도는 상당히 높다고 판단된다.
2. 준설 점토는 투기후 시간이 경과함에 따라 급격히 강도가 증가하는 경향을 보일 뿐만 아니라 함수비가 적어짐에 따라 강도는 현저히 커진다. 즉 점토와 실트는 모두 함수비가 액성한계의 약 두배이하인 범위에서 강도가 급격히 증가하는 경향을 보이는 반면, 소성지수의 경우 소성지수로 정규화한 함수비값이 실트는 10, 점토는 5 이하에서 강도의 급격한 증가 현상이 보이고 있다.
3. 준설 점토의 유동적관입시험 결과, 관입속도가 빨라짐에 따라 전단응력은 커지는 경향을 보였다. 또 관입속도 0.1~0.2cm/min

근방을 경계로 하여 두개의 Bingham 모델로 설명할 수 있다. 그러므로 영변형률의 전단응력을 구하는데는 저관입속도의 범위를 선택하는 것이 바람직하다고 생각된다.

금후에 회전 점도계를 이용하여 준설점토의 유동특성에 관한 연구를 계속할 계획이며 얇은 판 관입시험에 의한 연구를 병행하여 실제로 현장 및 실내 시험법으로 사용할 수 있도록 보다 많은 자료를 축적하고 초연약 점토의 강도에 따른 분류 시스템을 제안할 계획이다.

### 참 고 문 헌

1. 정인준, 유건선, "준설토의 기본적실험연구", 대한토목학회지, 제 27권, 제 5호, 1979, pp 55-64
2. 梅原 靖文, 善 功企, "超軟弱點土の壓密定數の決定法", 港灣技術研究所報告, 第 14卷, 第 4號, 1975 12, pp 45-65
3. 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
4. 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
5. 土質工學會基準(日本) 日本工業規格 (JSF T 412-1992), "土の定ひずみ速度壓密試驗方法"
6. 鶴谷 廣一, 中野 善, 鷹濱潤, "回轉粘度計により底泥の流動特性の檢討", 鷹港灣技術研究報告書, 第566號, 1986, pp. 3-29
7. ASTM 4189-89. "One-dimensional consolidation properties of soils using controlled-strain loading"
8. Crawford.C.B, "Interpretation of the consolidation test", ASCE Vol.90 Sep. 1964 pp 87-102
9. Head, K.H, "Manual of soil laboratory testing", Vol.3, pp 1197-1225, 1985
10. Inoue, T, Tan, T.S, Lee. S.L, "An investigation of shear strength of slurry clay", Soils & Foundations, Vol.30, No.4 Dec.1990, pp 1-10
11. 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
12. 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
13. Smith.R.E, Wahls.H.E, "Consolidation under constant rates of strain", ASCE Vol.95, No. SM 2 Mar.1969. pp 519-539
14. Tan,T.S, Yong, K.Y, Leong,E.C, Lee,S.L, "Behaviour of clay slurry", Soils & Foundations, Vol.30, No.4, Dec. 1990, pp 105-118
15. Tanner R.I. "Engineering Rheology", 1985, Clarendon Press, Oxford pp10-15
16. Umehara, Y, Zen,K, "Constant rate of strain consolidation for very soft clayey soils", Soils & Foundations, Vol.20 No.2 Jun, 1980 pp 79-95

(접수일자 1994. 10. 19)