

부산점토의 Fall Cone Test에 의한 지수 및 강도특성 Index Properties and Undrained Shear Strength of the Pusan Clays by Fall Cone Test

정 승 원¹⁾, Sueng-Won Jeong, 정 성 교²⁾, Sung-Gyo Chung, Pham Huy Giao³⁾,
곽 정 민⁴⁾, Jung-Min Kwag, 김 무 겸⁵⁾, Moo-Kyum Kim

¹⁾동아대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Dong-A Univ.

²⁾동아대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Dong-A Univ.

³⁾동아대학교 토목공학과 계약교수, Visiting Professor, Dept. of Civil Engineering, Dong-A Univ.

⁴⁾동아대학교 토목공학과 박사후과정, Post-Doc., Dept. of Civil Engineering, Dong-A Univ.

⁵⁾동아대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Dong-A Univ.

SYNOPSIS : The index properties of cohesive soils play an important role to examine entire tendency of soil properties. Especially, the Atterberg limits have a good correlation with compression and shear strength of cohesive soils. However, these values strongly depend on their testing methods. In this study, for Pusan clays the Atterberg limits were performed under different conditions; for example, four kinds of specimen preparation, two kinds of testing equipment, and four kinds of estimating method. And a laboratory vane test was performed to compare the undrained shear strength with that of the fall cone test. As experimental results, the value of liquid limit performed for oven-dried sample, followed in ASTM D4318, underestimated by about 10% compared to those of another three methods, irrespective to the used equipments. But the value of plastic limit was not influenced by sample preparation methods and equipments. The liquid limits by one-point methods(Leroueil et al., 1996; Nagaraj et al., 1981) were agreed well with those of different methods. Finally, the undrained shear strength by laboratory vane test was relatively larger than that of fall cone test, and the relationship between both showed a bad trend.

Key words: Atterberg limits, Casagrande method, Fall cone test, Undrained shear strength, Laboratory vane test.

1. 서 론

점성토에 대한 물리적 특성은 전반적인 토질특성을 규명하는데 기초적인 역할을 하고 있다. 이 중에서 Atterberg limits는 점성토의 압축 및 강도특성과 상관성이 있으므로 특히 중요한 의미가 있다. 현재 국내에서 수행되고 있는 액·소성한계 실험법은 주로 Casagrande방법에 의하여 이루어지고 있으며, 또한 시료조제방법도 임의적으로 수행하고 있는 실정이다. 그러나 동일한 시료라고 할지라도 시험기의 종류, 시료조제법 및 개인오차에 따라 그 결과는 크게 상이하게 될 것이다.

본 연구는 낙동강 하구지역에 분포하고 있는 부산점토에 대해서 시험기의 종류와 시료조제법에 따른 액·소성한계의 차이를 규명하는데 일차적인 목적이 있다. 이를 위하여 British fall cone과 Casagrande형 시험기가 사용되었으며, 그들의 값들은 Casagrande법, BS 및 일점법에 의하여 각각 구하였다. 그리고 시료조제법에 따른 결과의 차이를 규명하기 위하여 자연건조 상태, 노건조 상태, 염분수의 첨가 및

자연함수비 상태에 대하여 각각 실험을 수행하였다. 그리고 fall cone test에 의하여 자연시료 및 재성형 시료에 대한 비배수전단강도를 얻었으며, 이 결과는 실내배인시험에 의한 결과와 비교하였다.

2. 연구대상 위치 및 지반조건

2.1 실험시료

본 논문에 사용된 시료는 낙동강 하구지역 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 A(양산), B(김해), C(장유) 및 D(주촌)지역에서 채취되었다. A지역의 현장에서 직경 76mm의 피스톤샘플러 및 직경 300mm의 블록샘플러를 사용하여 시료를 채취하였고, 나머지 B, C 및 D 지역에 대해서 직경 76mm의 피스톤샘플러로써 시료를 채취하였다.

2.2 지반조건 및 시료채취 위치

낙동강 하구에서 A 지역의 지층구조는 상부로부터 실트질 점토층이 상당한 두께로 형성되어 있으며, 그 아래로 모래질 실트층이 형성되어 있다. B, C 및 D 지역의 경우 상부에 실트질 모래층이 분포하고 그 아래 점토층이 두껍게 분포하며 하부에 자갈 및 모래가 혼재되어 있는 지층형태를 보이고 있다. 그리고 부분적으로 3~4m의 모래층이 존재하고 있으나 이 층의 연속성에 대해서는 불분명하다.

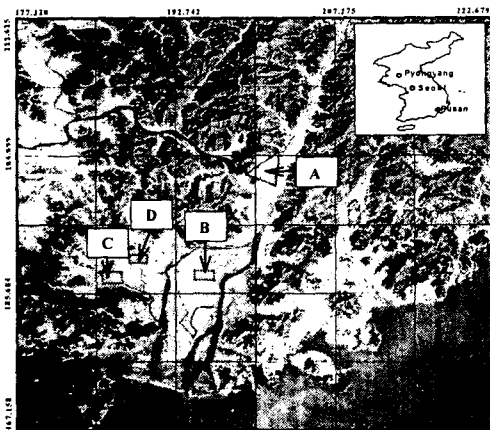


그림 1. 연구대상지역의 위치

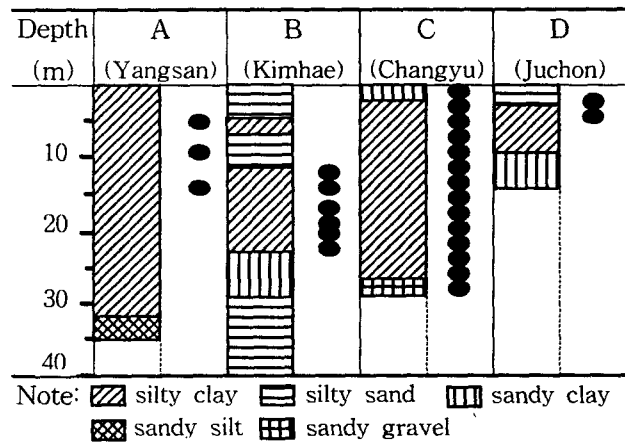


그림 2. 지반조건 및 시료채취위치

3. 실험종류 및 방법

3.1 시료조제법

본 논문에서는 현행에 이루어지고 있는 각종 시료조제법에 따른 액·소성한계의 차이를 규명하고자 아래와 같은 시료조제법이 사용되었다.

- (1) 자연건조방법: 자연함수비상태의 시료를 공기건조시켜 분쇄한 후 40번체로 친 시료를 준비한다.
- (2) 노건조방법: 건조로(105℃)에서 24시간 건조된 시료를 분쇄한 후 40번체로 친 시료를 준비한다.
- (3) 자연함수비에 의한 방법: 피스톤 및 블록샘플러에서 시료 추출 후 바로 재성형된 시료를 준비한다. 함수비는 실내건조에 의하여 조절한다.
- (4) 염분수 첨가: 일반적으로 위의 (1)과 (2)의 시료에 증류수를 첨가하여 시험을 수행하는 것이 원칙이며, 본 연구에서는 추가로 자연건조시료에 대해 미국 YSI 사의 33 and 33M S-C-T Meters를 사용하여 측정된 염분수를 첨가한 시료를 준비하였다.

3.2 액성한계 시험

본 실험을 위하여 Casagrande 형과 British type의 Fall cone 시험기가 사용되었다. Casagrande 형을 사용할 경우에는 KS F2303을 따랐으며, Fall cone 시험기를 이용할 경우 British Standards Institute (BS 1377/1975)를 기준으로 삼았다. 액성한계값은 실험방법에 따라 다음과 같이 결정하였다.

3.2.1 Casagrande 형 시험기

① 일반적인 방법(KS F2303): 황동접시에 경사 60° , 1cm의 인공사면을 조성한 후에 시료를 넣은 접시를 1cm의 높이에서 1초에 2회의 비율로 25회 낙하시켰을 때에 들로 나뉜 부분의 흙이 양측으로부터 유동하여 약 1.5cm의 길이로 합류했을 때의 함수비를 액성한계로 정의한다.

② 일점법: ASTM D-4318의 규정에 따른 일점법은 타격수 N 이 20~30사이의 범위에서 잘 적용되는 것으로 알려져 있다.

$$w_L = w \left(\frac{N}{25} \right)^{\tan \beta} \quad (1)$$

여기서, $\beta=0.121$ 의 값이 사용되어졌다.

3.2.2 Fall cone 시험기

① 일반적인 방법(BS 1377/1975): 관입량(d)-함수비(w) 관계에서 표준 콘이 5초 동안에 관입량 20mm에 해당되는 함수비를 액성한계로 정의한다.

② 일점법: CAN/BNQ 2501-092-M-86(CAN/BNQ 1986b)에 의해 다음과 같은 일점법(single-point method)으로 fall cone test에서 얻을 수 있는 액성한계를 제안하였다.

$$w_{LC} = \frac{20(w-15)}{P_{60} + 10} + 15 \quad (2)$$

여기서, 일점법은 P_{60} (60° 에 해당하는 관입깊이)가 8~12mm 범위 내에서 적용하도록 제안하였다. 또한 P_{30} (30° 에 해당하는 관입깊이)에 대해서는 다음과 같은 식 (3)을 제안하였다.

$$w_{LC} = \frac{40(w-15)}{P_{30} + 20} + 15 \quad (3)$$

Nagaraj 등(1981)에 의해 상기 공식과 유사한 일점법을 제안하였다.

$$w_{LC} = \frac{w}{0.65 + 0.0175P_{30}} \quad (4)$$

3.3 소성한계 시험

본 논문에서는 소성한계 시험에 대해 2 가지 방법이 채택되었다. 하나는 재래식 방법인 KS F2304에

기준으로 하였으며, Fall cone 시험기를 사용할 경우에는 Harison(1988)의 기준을 따랐다. 후자의 경우, BS cone penetrometer 시험에 의한 액·소성한계는 관입깊이 5~25mm 사이에서 수행되었으며, 반대수 곡선상에서 대략 14mm에서 관입깊이에 따른 두 직선이 교차한다. 소성한계의 경우, Harison(1988)은 Skempton 등(1953)에 의해 발표된 재성형 점토의 전단강도와 액성지수(I_L)사이의 관계를 이용하여 영국식 fall cone 시험기의 소성한계 결정법을 제안했다. 관입깊이 2mm에 해당하는 함수비를 소성한계로 정의하였다. 이 결과 일반적인 방법에 의한 값과 BS cone penetrometer 시험에 의한 소성한계는 대략 1.5%의 차이를 보인다.

또한 본 연구대상지역에 대해 Wood 등(1978)에 의해 보고된 Fall cone 시험에 의한 무게가 다른 두 개의 콘(W_1/W_2)을 사용하여 소성지수를 결정하는 식 (5)을 사용하여 일반적인 방법(ASTM D-4318)의 소성지수와 비교·분석하고자 한다.

$$I_P = \Delta \frac{\log 100}{\log W_1/W_2} = \Delta \frac{\ln 100}{\ln W_1/W_2} \quad (5)$$

여기서, Δ 는 콘의 관입깊이(d)에 따른 함수비의 차이이며, $W_1=80g$, $W_2=240g$ 을 사용하여 $W_1/W_2=3$ 일 때 소성지수 I_P 는 식(6)과 같이 간략히 표현할 수 있다.

$$I_P = 2\Delta / \log_{10} 3 \quad (6)$$

3.4 비배수전단강도

3.4.1 Fall cone test에 의한 비배수전단강도

Fall cone을 이용하여 점성토의 비배수전단강도를 결정하는데 있어서는 Geotechnical Commission of the Swedish State Railways (GCSSR)에 의한 관입깊이가 사용된다. 또한, Hansbo(1957)는 콘과 관입깊이의 함수비로부터 비배수전단강도를 구할 수 있는 다음과 같은 관계식을 제시한 바 있다:

$$C_u = K \frac{Q}{P^2} \quad (7)$$

여기서, C_u 는 비배수전단강도, Q 는 질량 M 을 가지는 콘의 무게, P 는 관입깊이, K 는 흙의 재성형 정도와 선단각의 함수비로부터 도출된 상수이다. 여기서 M 은 g, P 를 mm 그리고 C_u 를 kPa 단위로 환산하면 다음과 같은 식 (8)을 얻을 수 있다:

$$C_u = 9.8 K \frac{M}{P^2} \quad (8)$$

위의 식 (6)에 대하여 Karlsson (1977)은 재성형 점토에 대해 K 값은 30° 일 경우 0.8, 60° 일 경우 0.27을 적용하기를 제안하였으며, Wood (1985)는 각각의 선단각에 대해 0.85와 0.29의 유사한 값을 제안한 바 있다. 자연함수비 상태의 점토에 대해서, Hansbo (1957)는 선단각 30° 을 가지는 콘에 대한 K 를 1.0으로 제안했다(Leroueil et al., 1996). 본 연구에서는 콘 선단각 30° 에 대한 재성형 시료와 자연함수비 상태에 대해 0.8 및 1.0의 K 값을 각각 적용하였다.

Fall cone 시험으로부터 Leroueil 등(1983a)은 동부 캐나다 점토에 대해 비배수전단강도와 액성지수사이에서 비교적 일정한 분포를 찾을 수 있었으며 다음과 같은 식 (9)를 제안하였다.

$$c_{ur}(kPa) = (I_L - 0.21)^{-2} \quad (9)$$

3.4.2 실내 배인시험에 의한 비배수전단강도

실내 배인시험기는 현장 배인시험기와 같은 원리로 제작된 축소형 기기로 미국, 일본, 유럽 등지에서 널리 이용되어지고 있으며 일반적으로 20kN/m^2 이하의 전단강도 측정이 용이하다고 알려져 있다. 하지만 현장배인시험은 시험기준(KS F2342)이 제시된 반면 실내배인시험은 명확한 시험기준이 설정되어 있지 않은 실정이다. 현장기기에서는 일반적으로 Vane Blade가 길이 150mm, 폭 75mm인 것을 사용하지만 일반적인 실내배인시험기의 Vane Blade는 크기가 12.7~25mm 인 것을 사용하고 있다. 본 논문에서는 영국식 ELE 제품으로 Serial No. EL1103-7-1155인 실내 배인시험기를 사용하였다. 시험조건은 배인의 삽입깊이 45.4mm, 삽입속도 1.51mm/sec, 회전속도는 $10^\circ/\text{min}$ (BS기준)의 조건으로 대기시간을 2분 정도 가진 후 시험을 수행하였다. 본 연구에서 실시한 실내 배인 전단시험의 방법은 다음과 같은 순서로 수행되었다. 연직시료추출기상의 튜브를 고정하고 스프링의 선택한 후 기기 및 눈금 조정이 끝나면 배인을 삽입하여 전단강도를 측정한다. 이와 같은 단계를 5~7 단계의 반복하여 실시하였다.

4. 액·소성한계에 대한 실험결과 및 분석

4.1 시료조제법에 따른 액·소성한계

그림 3은 Casagrande 형 시험기를 사용했을 경우이며, 그림 4는 fall cone 시험기를 사용했을 경우의 일반적인 시료조제법인 자연건조에 대해 시료를 달리 준비했을 때의 액·소성한계에 미치는 영향을 보인 그림이다. 대략 0.5~3%의 염분을 소량함유하고 있는 부산점토의 경우 자연함수비 및 염분수가 첨가된 상태의 액성한계는 서로 유사한 범위의 값을 가지고 있으나 노건조상태의 액성한계값은 약간 작게 나타났다. 하지만, 시료조제법에 따른 소성한계값은 시험방법에 따라 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 시료조제법에서 자연함수비 및 염분수 첨가에 따른 액성한계가 노건조상태에 비해 물리적 힘이나 열에 의한 흩입자의 구조적 파괴를 덜 야기시킨 것으로 사료된다.

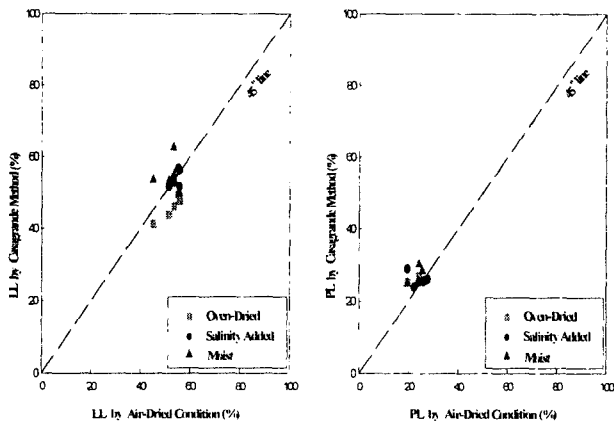


그림 3. Casagrande형 시험기의 결과

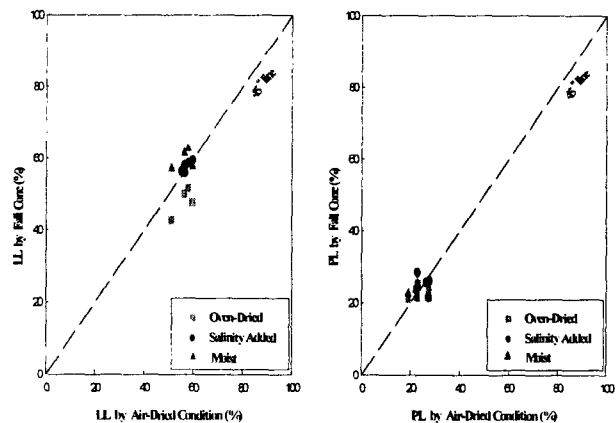


그림 4. Fall cone 시험기의 결과

4.2 실험기의 종류에 따른 액·소성한계

그림 5는 연구대상지역의 자연건조 조건에 대해 Casagrande 형 시험기와 fall cone 시험기의 액·소성한계를 비교한 것이다. 그 결과 동적액성한계 시험인 Casagrande 방법에 비해 정적액성한계 시험인 fall cone 시험에 의한 액성한계가 다소 큰 경향을 보였고, Fall cone 시험에 의한 액·소성한계는 Casagrande방법에 대해 $LL_{Fall}=1.04LL_{Cas}+3.64$ 및 $PL_{Fall}=0.81PL_{Cas}+3.51$ 의 상관관계를 보였다. 이와 같은 결과는 동적액성한계 시험인 Casagrande형 시험기가 Fall cone 시험기에 비해 강제교란에 의한 흩입자의 저항을 더 많이 받는 것으로 판단된다.

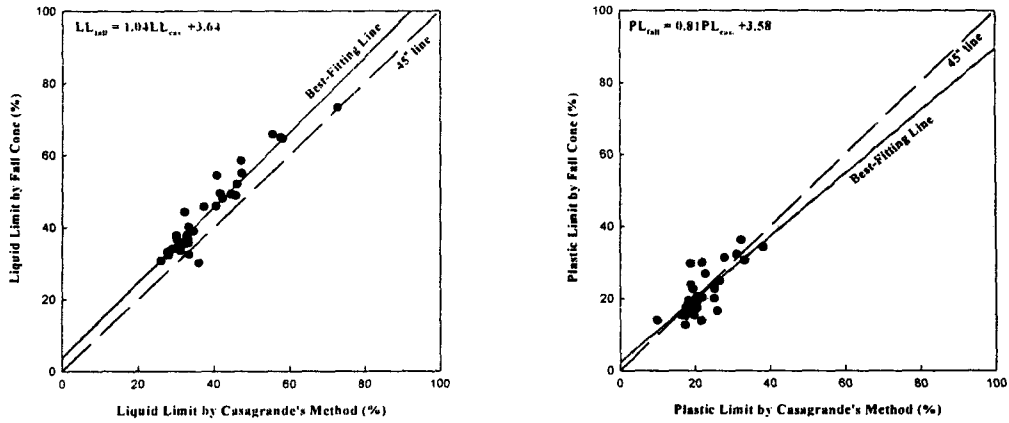


그림 5. 실험기의 종류에 따른 액·소성한계 비교

4.3 산출방법에 따른 액성한계의 비교

본 연구에서 Casagrande 형 시험기에 의한 일점법(a)의 경우 타격횟수 N이 20~30의 범위에 해당되는 함수비를 선택하였고, Fall cone 시험기를 이용한 일점법(b)에 대해서는 관입깊이(d)가 18~22mm 값에 해당하는 함수비(w)를 선택하여 액성한계를 산출하였다. 그림 6(a)는 Casagrande 형 시험기에 의한 일점법을 사용한 결과로 자연건조상태의 Casagrande 방법에 의한 결과와 대체로 잘 일치하였으며, 그림 6(b)에서는 Fall cone 시험에 의한 일점법의 결과로 Leroueil et al.(1996) 및 Nagaraj et al.(1981)에 의해 제시된 식 (3)과 (4)에 대해 상당히 잘 일치함을 보여주고 있다.

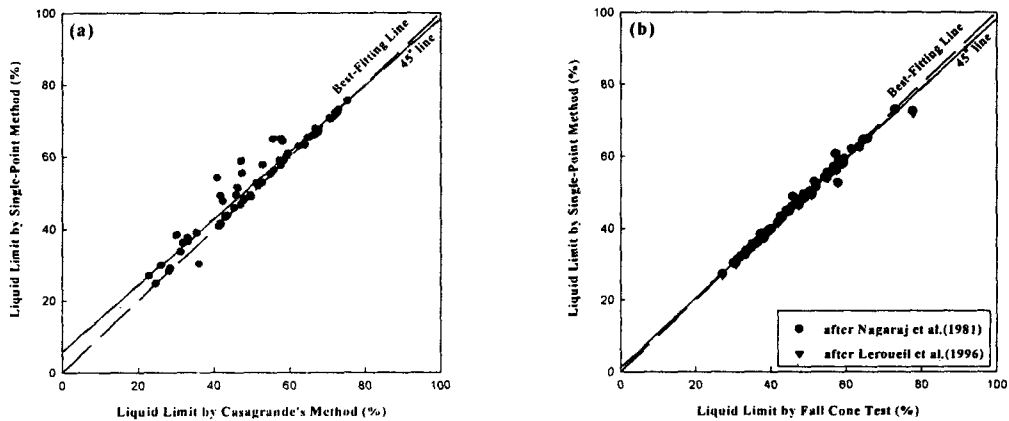


그림 6. 일점법(single-point method)에 의한 액성한계 비교

4.4 소성지수 (Plasticity Index, I_p)

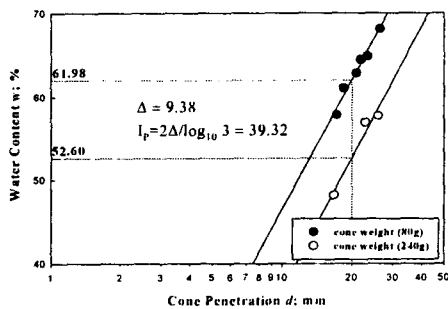


그림 7. Fall cone 시험에 의한 소성지수

본 부산점토에 대한 Casagrande 및 fall cone 시험에 의한 결과 일반적인 방법(ASTM D-4318)에 의한 소성지수($I_p = W_L - W_P$)는 30.11%인데 반해 Fall cone의 콘무게비(W_1/W_2)를 이용한 소성지수 I_p 는 39.32%로 나타났다. 이와 같은 결과는 Wood 등 (1978)이 보고한 2%보다 다소 큰 9%의 차이를 보였다.

5. 비배수전단강도에 대한 실험결과 및 분석

5.1 Fall cone 및 실내배인전단실험 결과의 비교

그림 7은 Fall cone과 실내배인전단실험에 의한 불교란 및 재성형시료의 비배수강도의 관계를 보인 것으로, 실내배인실험에 의한 비배수전단강도는 Fall cone에 의한 값보다 대략 20% 과대평가되어졌고, 재성형 시료에 대해서는 매우 산만한 분포를 보이고 있다. 이와 같은 불일치에 대해 Leroueil 등(1990)은 실내배인전단실험을 이용할 경우 다른 시험들과 병행하여 실험하거나 cone penetrometer를 이용할 것을 권장하고 있다. 이에 실내배인전단실험에 의한 비배수전단강도의 결정은 매우 조심스럽게 판정되어야 할 것이며, 신뢰적인 값을 얻기 위해 현장시험에 의한 값과 비교되어야 할 것으로 사료된다.

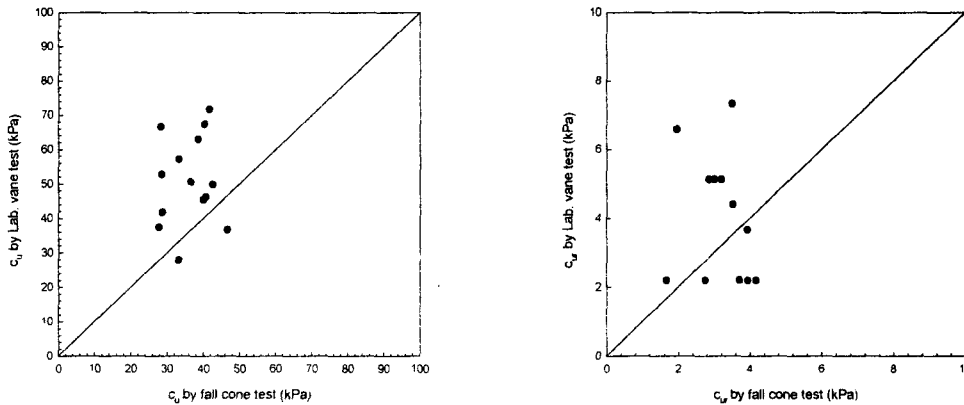


그림 8. Fall cone과 lab. vane에 의한 비배수전단강도 비교

5.2 비배수전단강도와 액성지수의 관계

그림 9는 본 연구에서 구한 비배수전단강도와 액성지수의 관계를 나타낸 그래프이며 그림에서 실선은 Leroueil 등이 제안한 식 (9)에 의한 값이다. 본 연구대상지역에 대해 양산지역에서는 식 (9)와 잘 일치하는 경향을 보이는 반면, 다른 두 지역에 대해서는 상기 경험식과 상당한 차이를 보이고 있다. 이는 비배수전단강도가 비교적 일정한데 반해 액성지수가 0.5~2.0의 범위로 상당히 큰 변화를 보이고 있는데, 이것은 점토의 불균질성에 의한 것으로 사료된다.

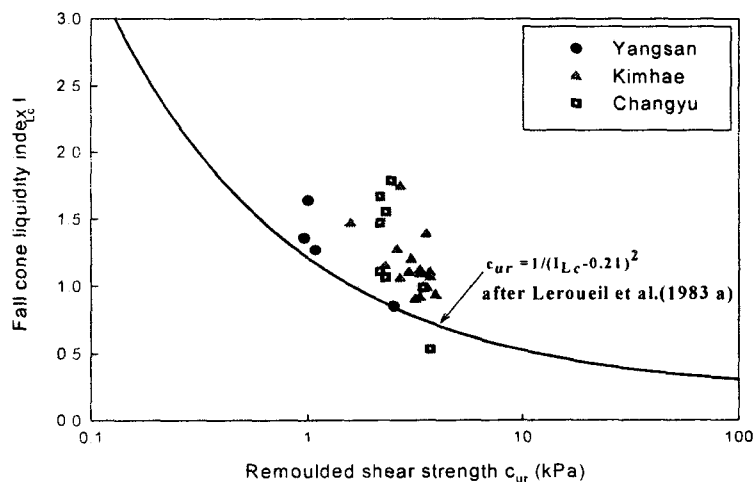


그림 9. 액성지수(I_L)와 비배수전단강도(c_{ur})의 관계

6. 결론

본 연구에서는 부산점토에 대해 Fall cone test를 사용하여 각종 지수 및 비배수전단강도를 얻었으며, 이 결과를 각종 시험법에 의한 결과치와 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구대상지역의 Casagrande 및 Fall cone에 의한 액·소성한계 시험을 수행한 결과, 시료조제방법 대해 자연건조, 자연함수비 및 염분수가 첨가된 상태의 액성한계는 서로 유사한 범위의 값을 가지고 있으나 노건조상태의 액성한계값은 약간 적게 나타났다. 하지만, 소성한계값은 시험방법에 따라 차이가 보이지 않았다. 시험기 종류에 따른 액성한계에서는 $LL_{Fall}=1.04LL_{Cas.}+3.64$ 를 얻을 수 있었다.
2. Fall cone 시험에 의한 아터버그한계는 Casagrande법에 의한 값에 비해 약간의 차이는 있지만 대체로 좋은 상관관계를 보이고 있으며, 시료조제법에 있어서도 노건조상태의 액성한계를 제외하고는 대체로 유사한 값을 보이고 있다. 따라서 염분을 소량 함유하고 있는 부산점토에 대해서는 자연건조법에 의하여 시료를 준비하고, Casagrande의 방법보다는 개인오차를 줄일 수 있는 fall cone 시험기를 사용함이 바람직 할 것으로 사료된다.
3. Casagrande 형 시험기에 의한 일점법은 일반적인 방법에 의한 값과 유사한 결과를 보였으며, Fall cone test의 일점법(single-point method)에 의한 액성한계 w_{LC} 은 Leroueil et al.(1996) 및 Nagaraj et al.(1981)에 의한 방법이 상당히 유사한 결과를 산출하였으며, Fall cone의 콘무게비에 따른 소성지수 I_p 는 일반적인 방법보다 다소 큰 값을 보였다.
4. 비배수전단강도의 관점에서 fall cone test에 비해 실내배인전단시험이 다소 큰 값을 가지며, 비배수전단강도(c_{ur})와 액성지수(I_L)의 관계는 비배수전단강도가 비교적 일정한데 반해 액성지수가 0.5~2.0의 범위로 상당히 큰 변화를 보이고 있으며, 이것은 점토의 불균질성에 의한 것으로 사료된다.

참고문헌

1. ASTM(1991), Standard Testing Method for Liquid limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, (D4318-84). *Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.08*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp.608~618.
2. CAN/BNQ(1986b), *Soils-Determination of liquid limit by the Swedish fall cone penetrometer method and determination of plastic limit*, Canadian Standards Association and Bureau de normalisation du Quebec, CAN/BNQ 2501-092-M-86.
3. Nagaraj, T. S. and Jayadeva, M. S.(1981), "Re-examination of one-point methods of liquid limit determination", *Geotechnique*, 31(3): pp.413~425.
4. Harison, J. A.(1988), "Using the BS cone penetrometer for the determination of the plastic limit of soils", *Geotechnique* 38, No.3, pp.433~438.
5. Head, K. H.(1980), *Manual of soil laboratory testing, volume 1: soil classification and compaction tests*, London: Pentech Press.
6. Leroueil, S., Magnan, J. P. and Tavenas, F.(1990), *Embankment on Soft Clays*, Ellis Horwood, pp.100~118.
7. Leroueil, S.(1996), "Liquid limit and fall cones", *Can. Geotech. J.* 33. pp.793~798.
8. Leroueil, S., Tavenas, F., and Le Bihan, J. P.(1983a), "Proprietes caracteristiques des argies de l'est du Canada", *Canadian Geotech. J.*, 20(4), pp.681~705.
9. Wood, D. M.(1985), "Some fall cone tests", *Geotechnique*, 35(1): pp.64-68.
10. Wroth, C. P. and Wood, D. M.(1978), "The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils", *Canadian Geotechnical Journal*, 15(2), pp.137-145.