

# 카사그란데방법과 원추관입시험방법의 상관관계와 지반개량제의 적용성에 대한 연구

## Correlation between Casagrande Test and Fall Cone Test Methods and their Applicability in Ground Improvement

고 권 우<sup>1</sup> Ko, Kun-Woo      여 동 준<sup>2</sup> Yeo, Dong-Jun  
김 경 민<sup>3</sup> Kim, Kyung-Min      이 병 석<sup>4</sup> Lee, Byung-Suk

### Abstract

In this study, a classification and uniaxial compression test of soil was conducted on 15 collapsed sites to use ground improvement with excellent protection effect owing to the increase of localized heavy rain in Korea. The Casagrande method and fall cone test were performed on the field soil to derive an expression for comparing liquid limit and plastic limit values, soil classification, and correlation between each other. By deriving the optimal mixing ratio of the ground improvement agent using uniaxial compressive strength for each soil classification, the classification of the fine-grained soil was not clear owing to the proficiency difference and test error. However, after classifying using the fall cone test, it was possible to suggest a clear optimal mixing ratio.

### 요 지

본 연구에서는 국내 국지성 호우의 증가로 인한 피해의 보호효과가 탁월한 지반개량제를 표층개량공법에 활용하기 위해 붕괴된 15개소의 현장토를 대상으로 흙의 분류 및 일축압축시험을 진행하여 토질별 최적배합비를 제안하는 연구를 진행하였다. 현장토에 대해 Casagrande법과 원추관입시험법을 실시하여 액·소성한계값의 비교, 흙의 분류 및 서로의 상관관계에 대한 관계식을 유도하였다. 각각의 흙의 분류에 대해 일축압축강도를 이용하여 지반개량제의 최적 배합비를 도출한 결과, Casagrande법으로 분류한 경우 실험자의 숙련도 차이와 시험의 오차에 의해 세립토의 분류가 명확하지 않았지만, 원추관입시험법으로 분류하였을 때 명확한 최적 배합비를 제안할 수 있었다.

**Keywords** : Casagrande method, Fall cone test, Ground improvement, Liquid limit, Plastic limit, Slope stabilization material

1 정회원, ㈜이지오 산업 (Member, E-Geo Construction Co.Ltd.)

2 정회원, 전북대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Ocean Engineering, Jeonbuk National Univ.)

3 비회원, 전북대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Ocean Engineering, Jeonbuk National Univ.)

4 정회원, 전북대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engineering, Jeonbuk National Univ., Tel: +82-63-270-4787, [leebs@jnbu.ac.kr](mailto:leebs@jnbu.ac.kr), Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2023년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

최근 지구 온난화로 인하여 국내를 비롯해 전 세계적으로 기후 변화가 진행되고 있다. 이러한 기후 변화로 인하여 국내의 장마는 6월부터 7월까지 장기간에 걸쳐 진행이 되었으나, 최근에는 7월 말부터 8월 초까지 폭우가 짧은 시간에 쏟아지며 단시간에 강수량이 높아지는 국지성 호우의 빈도가 잦아졌다(Yong-Seung Chung et al., 2004). 이로 인해 도로의 비탈면 등 여러 곳에서 지표면의 붕괴가 발생하고 이를 방지하기 위해 앵커(anchor), 네일링(nailing)공법들이 사용되고 있으나, 실질적인 유실이나 표면의 세굴에 대한 문제는 해결할 수 없다. 이를 해결하기 위해 친환경적이면서 경제적인 방법을 많이 시도 하는데 이 중 하나가 지반개량제를 활용한 표층개량공법이다. 표층개량공법은 일반적으로 표층의 전단강도를 크게 향상시켜 얇은 파괴나 대원호 파괴를 유발하는 침식 및 세굴에 피해를 막을 수 있는 비탈면 보호공법중 하나이다. 또한 Jason et al.(2017)은 이러한 표층개량공법의 효용성을 높게 평가함에 따라 많은 현장들이 안정성, 작업성, 경제성, 시공기간, 지속성 측면에서의 장점을 바탕으로 사용의 증가를 언급하였다.

표층개량공법은 앞선 장점들로 많이 사용되고 있으나, 현장에서의 적용기준이 모호하여 실제 적용 시에 많은 어려움이 있다. 현재 표층개량공법의 관리 방안으로 많이 사용되는 것은 한국도로공사 시방서이며, 이 기준에 따르면 현장 함수비 30%를 기준으로 30% 이하에서는 6%의 배합비, 함수비 30% 이상에서는 9%의 배합비를 제시하고 있다(Expressway Construction Specification, 2021). 그러나 이러한 기준에 대해 명확한 근거자료가 없으며 현장에서의 적용 시에는 재료, 토질, 함수비 등 품질에 영향을 받기 때문에 지반개량제를 사용할 경우 함수비만으로 적용하기에는 한계가 존재하므로 토질의 특성별 명확한 기준이 필요하다. 흙의 액·소성한계의 시험 결과 값은 실트와 점토의 분류 및 재료의 전단강도를

파악하는 정보를 제공하기 때문에 기준을 정할 때 가장 중요하게 미치는 요소 중 하나이다. 이 때 액성한계와 소성한계를 측정하는 방법은 국내에서는 Casagrande법(KS F 2303)이 존재한다. 그러나 Casagrande법은 자연 상태에서 정적인 요소인 액성한계를 동적인 방법으로 구하는 것에 모순이 존재하고, 각 시험자마다 숙련도의 차이로 인하여 오차가 존재하는 것으로 알려져 있다(Kim, 2005; Kim et al., 2017). 다른 방법은 1942년 Vasijev에 의해 GOST 5184로 처음 언급된 정적 시험 방법인 원추관입시험법(Fall Cone test)으로서 Casagrande법의 대안으로 제시 되었고, Hansbo(1957)도 Casagrande법의 오차 원인의 근본적인 부분이 장치에 있다고 판단하여 액성한계 측정방법으로 원추관입시험법을 제안하였다(Wood and Wroth, 1978; Feng, 2000). 두 방법으로 정확한 결과 값을 얻기 위해 많은 논문에서 두 시험을 비교하였으며, 시험결과에 대하여 변동계수를 비교한 결과 원추관입 시험법이 보다 변동계수가 작아 더 명확한 시험결과를 나타내는 것을 알 수 있었다(Sowers et al., 1960; Shimobe and Spagnoli, 2019).

본 논문에서는 붕괴된 15개소의 현장을 대상으로 Casagrande법과 원추관입시험법 두 가지를 활용해 액·소성한계 값을 분석하여 각 시험별 흙의 분류 및 서로의 상관관계를 선행 문헌자료와 비교 분석 및 유도 하였고, 각 시험 결과 값의 신뢰성을 검토해 보았다. 그 후 각각의 흙의 분류에 대해 일축압축시험을 진행하여 토질의 특성이 지반개량제의 최적 배합비에 미치는 영향을 비교 분석 하였다.

## 2. 액·소성한계 측정방법

### 2.1 Casagrande법

Casagrande법에 의한 액성한계 측정방법은 동적인 시험으로 KS F 2303으로 규정되어 있다. 이때 시험장비



Fig. 1. Slope surface failure and erosion

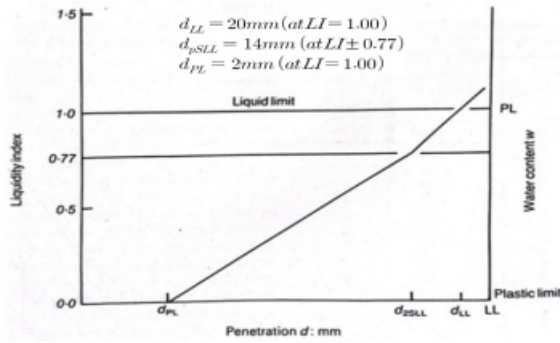


Fig. 2. Fall cone test by Harrison (1988)

는 경도가  $88 \pm 5 \text{mN}$ 의 경도를 가지는 타격대를 기준으로 한다. 그리고 시험방법은 황동접시가 경사  $60^\circ$ , 높이  $1 \text{cm}$ 의 높이에서 1초에 2회로 25회 낙하 시 황동접시 위의 시료가  $1.5 \text{cm}$ 의 길이로 붙을 때의 함수비를 액성한계로 정의한다. 그러나 정확히 25회를 파악하기 어려우므로 10~25회 2번, 25~40회 2번 등 근접한 범위에서 함수비를 변화 시킨 타격횟수를 이용하여 유동곡선을 얻어내 액성한계를 구한다. 그리고 소성한계 또한 KS F 2303으로 규정되어 있으며, 시험방법은 다공판 위에 반죽한 시료를 놓고 손바닥으로 밀어  $3 \text{mm}$  정도의 직경으로 성형 후, 시료가 부서지기 시작하는 함수비를 소성한계라 정의한다.

## 2.2 원추관입시험법(Fall Cone test)

원추관입시험법은 액성한계 측정방법으로, 정적인 시험방법이다. 잘 다져 놓은 점성토 위에 원추를 올려놓으면 흙의 연경도에 맞추어 원추의 자중에 의해 관입량이 달라지는 원리를 이용한 것이다. 이러한 과정을 거쳐 흙의 액성한계를 구할 수 있다. 원추관입시험의 장치는 크게 영국과 스웨덴으로 기준을 나눌 수 있다. 각 나라마다 기준이 조금씩 다른데, 먼저 스웨덴의 원추는  $60^\circ$  선단각에 무게는  $60 \text{g}$ 으로 제작되어있고, 영국은 BS 1377로 원추의 선단각이  $30^\circ$ , 원추와 수직관의 무게는 총  $80 \text{g}$ 으로 이루어진 기구를 사용한다. 액성한계 값은 위에 제시한 원추가 5초 동안  $20 \text{mm}$  관입되었을 때의 함수비이다. 따라서 관입량을  $15 \sim 25 \text{mm}$  4회,  $14 \sim 20 \text{mm}$  2회,  $20 \sim 25 \text{mm}$  2회 이상 실시한다. 원추관입시험에서 일점법에 의한 액성한계 결정 방법은  $20 \text{mm}$ 에 가까운 관입량과 그때의 함수비를 측정하고 이 결과로 액성한계를 측정하는 방법이다(Sherwood and Riley, 1970; Nagaraj and Jayadev, 1981; CAN/BMO, 1986).

$$C_u = \frac{kW}{d^2} \quad (1)$$

$d$  : 콘 관입시험 시 관입 깊이

$W$  : 콘의 무게

$k$  : 콘의 형상계수

$C_u$  = 비배수 전단강도

원추관입시험에 의한 소성한계 측정방법은 액성한계 시험과 같은 방법으로 실행한다. 시험시 관입깊이가  $2 \text{mm}$  일 때의 함수비를 소성한계로 결정한다. 그러나  $2 \text{mm}$ 는 실제 측정이 불가 하므로 추세를 연장하여 해당 지점의 함수비를 찾아 결정해야 하는 단점이 있다. 원추관입 시험법에는 여러 가지 방법이 존재 하는데 그중 Harrison (1988)방법과 Feng(2000)이 제안한 방법들이 존재 한다. Harrison방법은 소성한계를 결정하기 위해 Fig. 2와 같이 관입량-함수비의 관계를 제시하였다. 식 (1)을 이용하여 비배수전단강도의 2배 값의 관입깊이를 구한 후  $14 \sim 25 \text{mm}$  사이의 관입량으로 액성한계를 결정하고, 이론적으로 두 선의 교점이  $d=14 \text{mm}$ 에 있다는 가정 하에  $14 \text{mm}$ 에서  $5 \text{mm}$ 까지 부가적으로 시험 후 아래의 선을 그릴 수 있다. 이때 정확성을 위하여  $d$ 가 약  $5 \text{mm}$  이고, 다른 한 개는  $d$ 가  $10 \text{mm}$ 인 시험을 두 번하는 것이 좋다. 하부 라인에서 얻은 두 점의 기울기로  $d=2 \text{mm}$ 의 함수량을 얻어 소성한계를 측정할 수 있다.

Feng이 제안한 방법은 기존의 시료컵에  $10 \text{mm}$ 정도 높이의 컵을 새로 씌운 컵을 활용한 방식이다. 하지만 소성한계를 구하는 방식에서 Harrison과는 다르게 관입량-함수비 관계를 양대수 눈금을 취할 경우 선형을 나타내는 경향을 확인하였고, 식 (2), (3)와 같은 방법을 제안하였다.

$$\log W = \log C + m \log d \quad (2)$$

$$w_{pL} = c(2)^m \quad (3)$$

이 때,  $W$  : 콘의 무게

$C$  : 전단강도

$w_{pL}$  : 소성한계

$d$  : 콘 관입시험 시 관입 깊이

### 3. 흙의 물리적 시험 및 강도 측정 방법

#### 3.1 흙의 물리적 시험 방법

세굴 및 침식에 대한 저항성을 크게 하기 위해서는 토질별 분류, 사용되는 지반개량제의 재료적 특징, 함수비, 다짐도 등 여러 가지 요인에 의해 좌우된다. 최적의 강도발현 조건을 검토하기 위해서는 먼저 토질의 명확한 공학적 분류가 필요하다고 판단하여 현장의 원지반 토에 대하여 물리적 시험을 수행하였다. 특히, 세립토의 공학적 분류 방법인 Casagrande법은 KS F 2303으로 규정되어 있지만, 정적 요소인 액·소성한계를 동적인 시험 방법으로 측정하는 것에 대하여 몇몇 연구자들은 문제점을 지적하고 있다(Wood and Wroth, 1978; Feng, 2000). 따라서 정적 시험방법중 하나인 원추관입시험을 활용 및 병행 하여 흙을 분류하였다.

#### 3.2 강도 측정 방법

E사의 AAS계 무기결합재를 활용한 지반개량제의 배합비에 따른 함수비별 일축압축강도를 일축압축시험을 통하여 얻어내었다. 일축압축시험의 공시체는 직경 5cm, 높이 10cm의 원통형 모양으로 제작하였고, 장기강도를 확인하기 위하여 90일 양생 후 강도를 측정하였으며, 공시체 제작은 KS F 2312를 참조하여 흙의 다짐시험 방법 중 A다짐방법의 다짐에너지지를 기준으로 제작하였다. 이는 현장에서 시공할 시 백호를 통한 다짐을 수행하기에 적절한 현장 적용성을 고려한 것이고, 공시체 제작 시 지반개량제는 원지반의 중량 대비 각 6%, 9%, 12%를 혼합 후 견비범하여 제작하였다. 시험을 진행한 최적 함수비보다 너무 높거나 낮으면 제작이 불가능하여, 이를 제외한 나머지 군에 대해 시험을 진행하였다. 또한

시료의 강도 특성 상 최대 재하하중 3ton의 시험기를 이용하여 1mm/min의 속도로 재하시켜 일축압축강도를 측정하였다.

### 4. Casagrande법과 원추관입시험법

#### 4.1 Casagrande법과 원추관입시험법의 정확도 비교

앞서 토질의 분류방법이 중요하다 판단되어 Casagrande법과 원추관입시험법의 정확도를 비교 분석하였다. Table 1에서는 Casagrande법에서 액성한계를 구하는 추세선인 로그함수와 원추관입시험법에서 액성한계를 구하는 추세선인 지수함수를 나타내었고, 추가적으로 각 시험에서의 결정계수인  $R^2$ (Coefficient of Determination)을 나타내었고 이를 도출할 때의 데이터의 수를  $n$ 으로 나타내었다. Casagrande법은 로그함수를 이용해 추세선을 그려 얻어낸 함수식에 25회의 타격횟수를 대입하여 액성한계를 산정하였으며, 결정계수는 회귀식의 적합성을 판단하는데 사용되어 시험데이터의 정확도를 나타낸다. 각 시험데이터들의 정확도가 높을수록  $R^2$  값이 1에 가까워지며 부정확할 시에는 0에 가까워지는 특징을 가지고 있다. 우측의 거듭제곱도 마찬가지로 추세선을 그려 함수식을 얻어  $x$ 에 20mm의 관입량을 대입하여 액성한계를 구하고, 2mm의 관입량을 대입하여 소성한계를 구하였다. 마찬가지로  $R^2$ 을 나타내서 회귀식의 정확도를 나타내었다.

Casagrande법을 이용한 액성한계시험 결과는 일부 군에서는 0.9924, 0.9904 등 높은 정확도를 보였지만, 0.226과 같이 매우 낮은 시험군도 존재한다. 반면에 원추관입시험법 같은 경우에는 Casagrande법의 정확도에 비해 비슷하거나 일부 낮은 것으로 나타났으나 신뢰도 높은 실험으로서 판단하기 위해 분산과 표준편차를 비교하



Fig. 3. Sample curing and uniaxial compressive test apparatus

Table 1. Logarithmic function, Exponentiation and R<sup>2</sup> by Casagrande and Fall Cone Test

Site	Casagrande method			Fall Cone test method		
	Logarithmic function	R <sup>2</sup>	n	Exponentiation	R <sup>2</sup>	n
Damyang A	$y_1 = -2.244\ln(x_1) + 41.049$	R <sup>2</sup> = 0.8774	32	$y_2 = 16.3197x_2^{0.1948}$	R <sup>2</sup> = 0.9937	30
Damyang B	$y_1 = -3.136\ln(x_1) + 37.995$	R <sup>2</sup> = 0.9036	35	$y_2 = 22.88x_2^{0.1588}$	R <sup>2</sup> = 0.8528	30
Jeonju	$y_1 = -6.351\ln(x_1) + 52.933$	R <sup>2</sup> = 0.9667	34	$y_2 = 13.524x_2^{0.3498}$	R <sup>2</sup> = 0.9684	32
Naju A	$y_1 = -3.458\ln(x_1) + 41.937$	R <sup>2</sup> = 0.9904	28	$y_2 = 18.323x_2^{0.2483}$	R <sup>2</sup> = 0.9675	34
Naju B	$y_1 = -14.74\ln(x_1) + 98.102$	R <sup>2</sup> = 0.8867	31	$y_2 = 24.202x_2^{0.255}$	R <sup>2</sup> = 0.9747	33
Goryung A	$y_1 = -10.37\ln(x_1) + 90.87$	R <sup>2</sup> = 0.9293	33	$y_2 = 27.809x_2^{0.2749}$	R <sup>2</sup> = 0.9914	37
Goryung B	$y_1 = -9.141\ln(x_1) + 84.546$	R <sup>2</sup> = 0.7482	33	$y_2 = 18.728x_2^{0.3619}$	R <sup>2</sup> = 0.9589	35
Gurye A	$y_1 = -4.594\ln(x_1) + 45.339$	R <sup>2</sup> = 0.8595	39	$y_2 = 21.282x_2^{0.1871}$	R <sup>2</sup> = 0.7726	28
Gurye B	$y_1 = -4.084\ln(x_1) + 44.31$	R <sup>2</sup> = 0.9917	40	$y_2 = 17.853x_2^{0.2227}$	R <sup>2</sup> = 0.8861	30
Gwangyang	$y_1 = -3.767\ln(x_1) + 42.734$	R <sup>2</sup> = 0.9867	35	$y_2 = 14.732x_2^{0.3318}$	R <sup>2</sup> = 0.979	31
Goksung	$y_1 = -4.5\ln(x_1) + 45.11$	R <sup>2</sup> = 0.8352	33	$y_2 = 21.644x_2^{0.1851}$	R <sup>2</sup> = 0.7077	29
Imsil	$y_1 = -1.622\ln(x_1) + 35.035$	R <sup>2</sup> = 0.226	26	$y_2 = 21.689x_2^{0.1652}$	R <sup>2</sup> = 0.9537	37
Jinan A	$y_1 = -3.327\ln(x_1) + 41.721$	R <sup>2</sup> = 0.8555	30	$y_2 = 18.059x_2^{0.2072}$	R <sup>2</sup> = 0.8537	28
Jinan C	$y_1 = -2.654\ln(x_1) + 37.643$	R <sup>2</sup> = 0.7206	32	$y_2 = 18.066x_2^{0.2223}$	R <sup>2</sup> = 0.8866	31
Gyeongju	$y_1 = -6.468\ln(x_1) + 56.153$	R <sup>2</sup> = 0.9924	33	$y_2 = 20.775x_2^{0.2188}$	R <sup>2</sup> = 0.9039	34
R <sup>2</sup>	Average	0.8513		Average	0.9100	
	Variance	0.0347		Variance	0.0067	
	Standard Deviation	0.1863		Standard Deviation	0.0821	

$x_1$  : Number of Drop by Casagrande,  $y_1$  : Water Content,  $x_2$  : Depth by Fall cone,  $y_2$  : Water Content,  $n$  : Number of Data

였다. Casagrande법의 분산은 0.0347, 표준편차는 0.1863 이고 원추관입시험법의 분산은 0.0067, 표준편차는 0.0821 로서 두 실험 중 원추관입시험법의 실험 결과가 더 신뢰도가 있다고 판단되었다. 따라서, 원추관입시험법을 이용하였을 경우 Casagrande법을 이용한 결과 보다 일관되고 정확한 액성한계 값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4.2 Casagrande법과 원추관입시험법의 상관관계

추가적으로 본 연구에서 Casagrande법과 원추관입

시험법의 상관관계와 관련된 선행 연구자들의 논문 시험 결과값들을 정리한 결과와 비교해 보았고, 이때 원추관입시험법으로 액성한계와 소성한계를 구하는 방법은 Harison(1988)방법과, Feng(2000)방법이 존재하는데 본 시험에서는 Feng(2000)방법을 채택하였다. 그리고 Casagrande법에는 타격대의 경도를 바탕으로 Hard base 와 Soft base로 나뉘는데 이중 국내의 KS 규격인 88±5 를 사용하였고, 원추관입시험법은 콘의 각도와 무게로 나뉘는데 이때 BS규정인 60°, 80g으로 사용하였다. 이를 바탕으로 Table 2에 Satoru Shimobe(2019)의 자료 중에서 수집한 액·소성한계에 대한 상관관계 중 동일한

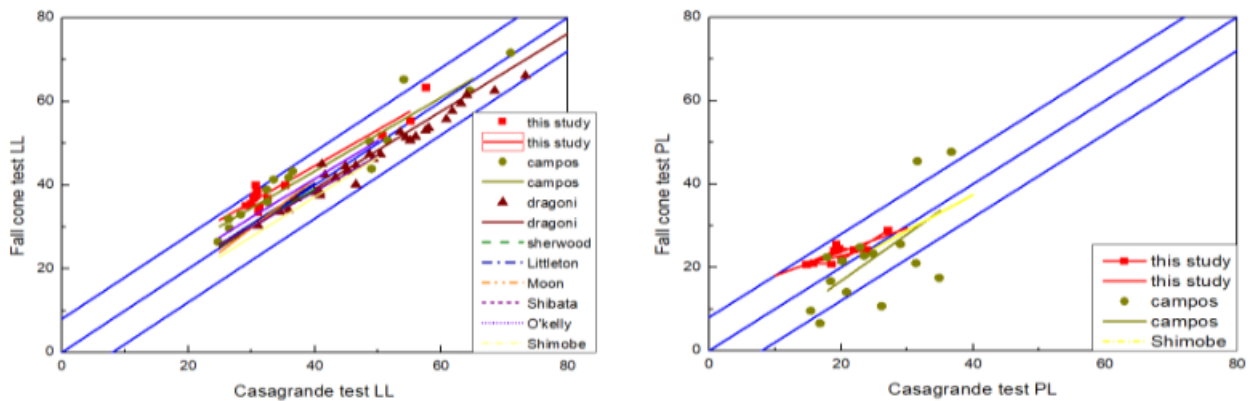


Fig. 4. Proposed equation using Casagrande and Fall Cone Test

Table 2. Summary of all correlations between Casagrande and fall cone methods on both LL and PL compiled from numerous references around the world

Proposer	Proposed equation (LL)		Proposed equation (PL)	Casagrande base		Apex angle (°)	Mass (g)
	$LL \leq 150\%$	$LL < 600\%$		Hard base	Soft base		
Sherwood and Ryley (1968, 1970)	$LL_c = 0.909LL + 2.73$ ( $LL = 25 \sim 90\%$ ) $LL_c = 0.95LL + 0.95$ ( $LL = 30 \sim 72\%$ )				○	30	80
Littleton and Farmilo (1977)	$LL_c = 0.97LL + 1.6$	$LL_c = 1.24LL - 4.8$ $- 2.6 \times 10^{-3}LL^2 + 33 \times 10^{-7}LL^3$			○	30	80
Moon and White (1985)	$LL_c = 1.1625LL - 5.0953$				○	30	80
Shibata et al. (1998)	$LL_c = 0.79LL + 4$ ( <i>SS cone</i> ); $LL_c = 0.85LL + 4.5$ ( <i>BS cone</i> )				○	60/30	60/80
Campos et al. (1999)	$LL_c = 0.88LL + 8.13$		$PL_c = 1.12PL - 5.66$	○		30	80
Dragoni et al. (2008)	$LL_c = 1.02LL + 2.87$ ( <i>hard</i> ); $LL_c = 0.93LL + 1.94$ ( <i>soft</i> )			○	○	30	80
O'Kelly et al. (2018)	$LL_c = 1.62LL^{0.88}$ ( $n = 199, R = 0.98$ ) $LL_c = 1.45LL^{0.92}$ ( $n = 188, R = 0.98$ )	$LL_c = 1.86LL^{0.84}$ ( $n = 216, R = 0.99$ ) $LL_c = 1.90LL^{0.85}$ ( $n = 199, R = 0.98$ )		○	○	30 30	80 80
Satoru Shimobe et al. (2019)	$LL_c = 0.9505LL - 0.8499$		$PL_c = 0.8558PL + 3.14$		○	30	80

$LL_c$  : Liquid Lim by Fall Cone method,  $LL$  : Liquid Lim by Casagrande method  
 $PL_c$  : Plastic Lim by Fall Cone method,  $PL$  : Plastic Lim by Casagrande method

규격과 일치하는 자료들을 선별하였고, 이 정보값들을 Fig. 4에 도시하였다. 이는 모두  $\pm 8\%$ 의 오차범위안에 들어오는 것을 확인할 수 있었고, 액·소성한계값들로 관계식을 이끌어 기존의 Shibata et al.(1998)과 유사한  $LL_c = 0.8622LL - 10.105$ 과  $PL_c = 0.5701PL + 12.322$ 를 얻어낼 수 있었다. 그러나 이는 다소 적은 국내의 시료만으로 얻은 관계식이므로 더 자세한 관계식이나 현장에서 활용을 위한 보조수단이 되려면 보다 많은 현장의 자료를 추가하여 신뢰성 검증과 보완이 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 시험 결과

### 5.1 물리적 시험 결과

본 연구에서 사용한 원지반의 시료는 총 15군의 현장으로 실제 사면 붕괴 현장의 시료를 사용하여 진행하였으며 원지반의 물리적 시험결과는 Table 3과 같이 나타내었으며, Casagrande법과 원추관입시험법으로 각각 구한 액·소성한계 값 또한 나타내었다.

### 5.2 일축압축강도와 최적배합비 산정 이유

일축압축시험의 90일 강도의 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 전반적으로 지반개량제의 함유율이 높을수록 강도발현이 높다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 결과에서 확인할 수 있듯이 강도 발현에 있어 일정한 규칙성이나 일관성을 띄지 않았다. 단순히 지반개량제의 함유 비율을 높여도 강도가 비례하여 증가하지 않고 배합비-함수비에 따른 강도발현에 대하여 변곡점이 존재하는 것으로 보인다. 따라서 지반개량제를 활용하기에는 적정함수비와 토질별 분류에 따른 배합비가 다른 것으로 판단되었다. 각 현장의 배합비율-함수비에 따라 다르며, 현장에서 시공할 때에 일정한 품질 관리를 위해서는 일정한 기준에 따른 배합비율이 필요하다. 표층개량 공법은 붕괴된 현장을 지반개량제와 배합하는 일종의 토공사이므로 현장에서의 품질관리는 다짐도를 통하여 확인한다. 이를 착안하여 최대건조단위중량에서의 함수비를 통하여 최적 배합비를 산정해 보았다. 이때 최대건조단위중량과 최적함수비(Optimum Moisture Content, O.M.C)를 활용하는 이유는 이 상태에서의 토질이 최대 전단강도를 가지고 투수계수가 가장 작기 때문에 역학

Table 3. Physical properties of soils

Mechanical analysis		DamYang A	DamYang B	JeonJu	Naju A	Naju B	Goryung A	Goryung B
D10 (mm)		0.009	0.001	0.003	0.002	0.002	0.005	0.0095
D30 (mm)		0.050	0.050	0.055	0.029	0.008	0.007	0.11
D60 (mm)		0.090	0.068	0.100	0.090	0.050	0.009	0.035
Passed #200 sieve (%)		57.700	73.300	54.900	58.000	62.500	97.000	91.2
Passed #4 sieve (%)		85.60	99.600	99.100	99.600	99.900	99.400	99.1
Specific gravity		2.650	2.650	2.700	2.650	2.650	2.510	2.69
Optimum moisture content (%) [A]		15.900	20.100	17.100	14.600	17.500	25.600	26.8
Casagrande	U.S.C.S	CL	CL	CL	CL	CL	CH	CH
	Plastic limit (%)	18.590	19.230	17.600	20.090	27.100	23.060	18.93
	Liquid limit (%)	33.830	30.340	32.490	30.810	50.660	57.490	55.12
	Plasticity Index (%)	15.240	11.110	14.890	10.720	23.560	34.430	36.19
Fall cone	U.S.C.S	CL	ML	ML	CL	MH	MH	CH
	Plastic limit (%)	18.540	25.540	28.310	21.760	28.880	33.650	24.07
	Liquid limit (%)	29.030	36.820	36.085	38.550	51.950	63.360	55.38
	Plasticity Index (%)	10.490	11.280	8.540	16.790	23.070	29.720	31.31

Mechanical analysis		Gurye A	Gurye B	GwangYang	GokSung	ImSil	JinAn A	JinAn C	GyeongJu
D10 (mm)		0.01	0.001	0.02	-	-	0.0054	0.0026	0.02
D30 (mm)		0.17	0.15	0.068	-	-	0.0500	0.0800	0.4
D60 (mm)		0.85	0.75	2.5	-	-	2.9	0.2200	1.75
Passed #200 sieve (%)		17.9	19.8	34.6	33.7	29.6	33.7	27.9	14.8
Passed #4 sieve (%)		96.8	94.3	68.3	96.8	99.8	77.8	98.3	89.1
Specific gravity		2.62	2.65	2.74	-	-	2.68	2.66	2.68
Optimum moisture content (%)		11	11	16.2	13	16.3	19.5	15.9	11.6
Casagrande	U.S.C.S	SM	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC
	Plastic limit (%)	23.81	14.72	19.25	19.57	21.90	18.49	15.79	15.33
	Liquid limit (%)	30.55	31.16	30.61	30.63	29.81	31.01	29.1	35.33
	Plasticity Index (%)	6.74	16.43	14.35	11.06	7.92	12.52	13.31	20.00
Fall cone	U.S.C.S	SC	SC	SC	SC	SM	SC	SC	SC
	Plastic limit (%)	24.23	20.83	18.54	24.60	24.32	20.85	21.07	24.17
	Liquid limit (%)	37.28	34.78	39.81	37.698	35.58	33.59	35.16	39.99
	Plasticity Index (%)	13.05	13.96	21.26	13.08	11.26	12.75	14.09	15.82

적으로 가장 유리한 상태이기 때문이다. 또한 현장 시공 시 최적 배합비를 위한 목표 강도 값의 명확한 설계기준이 존재하지 않기 때문에, 공법 적용 후 녹화공법이 적용되는 것에 맞춰 Table 4인 국토교통부(MOLIT, Ministry of Land, Infrastructure and Transport)에서 제시한 도로비탈면 녹화공사 설계 및 시공지침의 토양경도계 관입 깊이에 따른 식물 생육관계를 통해 원활한 식물 생육이 가능한 1,300~2,800kPa을 목표 강도로 설정하였고, 이 강도범위를 SL(Strength Line)이라 한다. 이를 그래프에 도시하였고, 최적함수비와 최적함수비의 건조축과 습윤축의 함수비선과 교차하여 해당하는 영역을 선택하였고 이 영역을 최적 배합비로 선정하였다. 이때 시험의 결과들을 통하여 최적함수비의 -5%에서는 강도발현이

낮고, 현장에서 습윤 측에 함수비를 맞추어 시공하는 것이 용이하기 때문에 최적함수비의 +5%의 강도 기준을 설정하여 최적 배합비를 선정하였다.

결과적으로 최적함수비와 최적함수비의 +5%, 1,300~2,800kPa의 영역을 기준으로 최적배합비를 산정하여 교차하는 배합비율을 선정한 결과를 Table 5에 나타내었다. 이때 영역 내에 두 가지 배합비가 겹칠 경우 경제성을 고려하여 작은 배합비를 선정하였고 적정 강도 범위를 활용하여 각 현장에 맞는 최적 배합비를 제시하였다. 현장별 시험을 통한 최적의 배합비율에 빠른 설계와 시공을 위하여 공학적 분류를 통한 기준을 고려해 보았다.

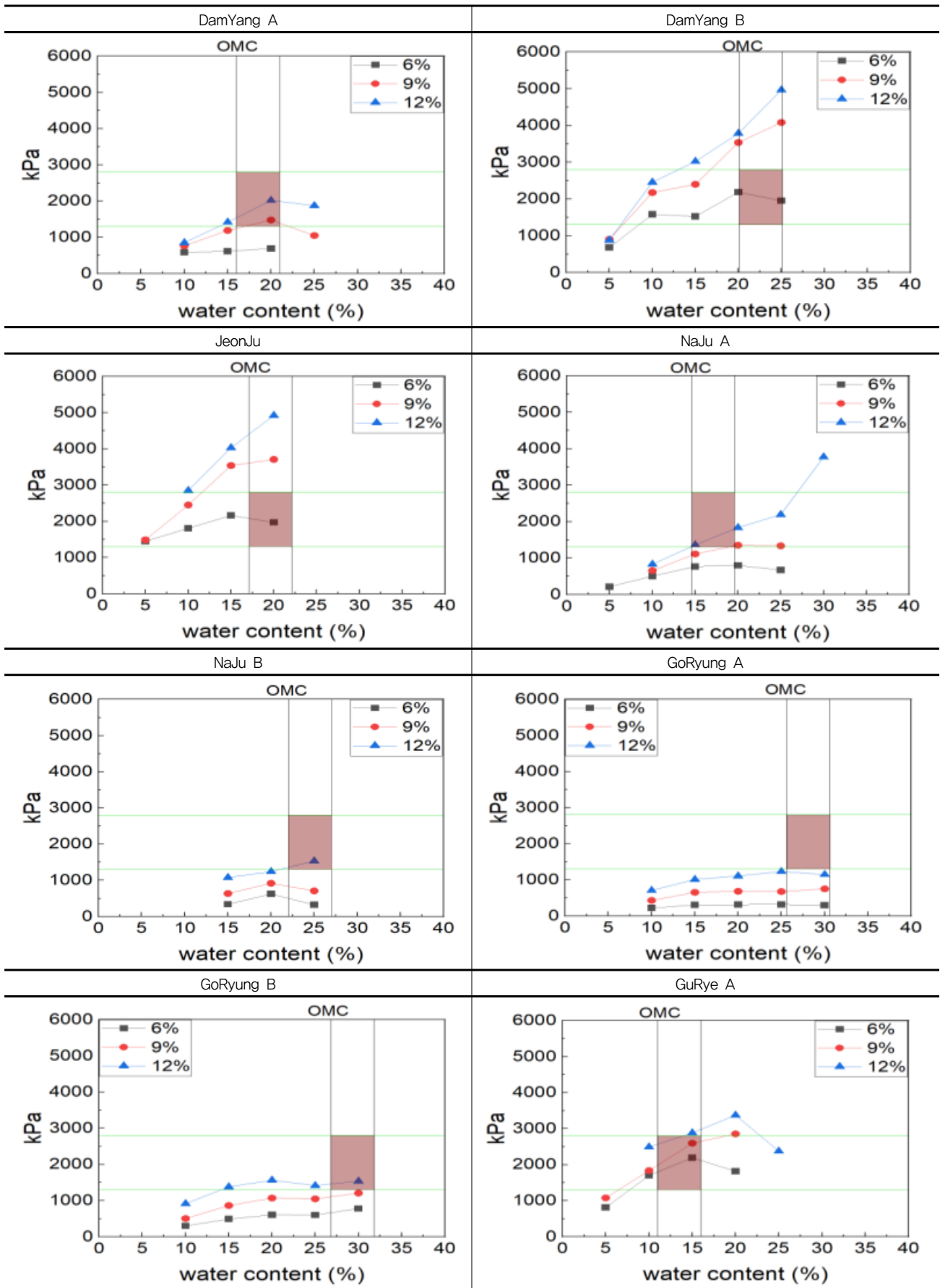


Fig. 5. Uniaxial compressive graph (Ground improvement content–water content)



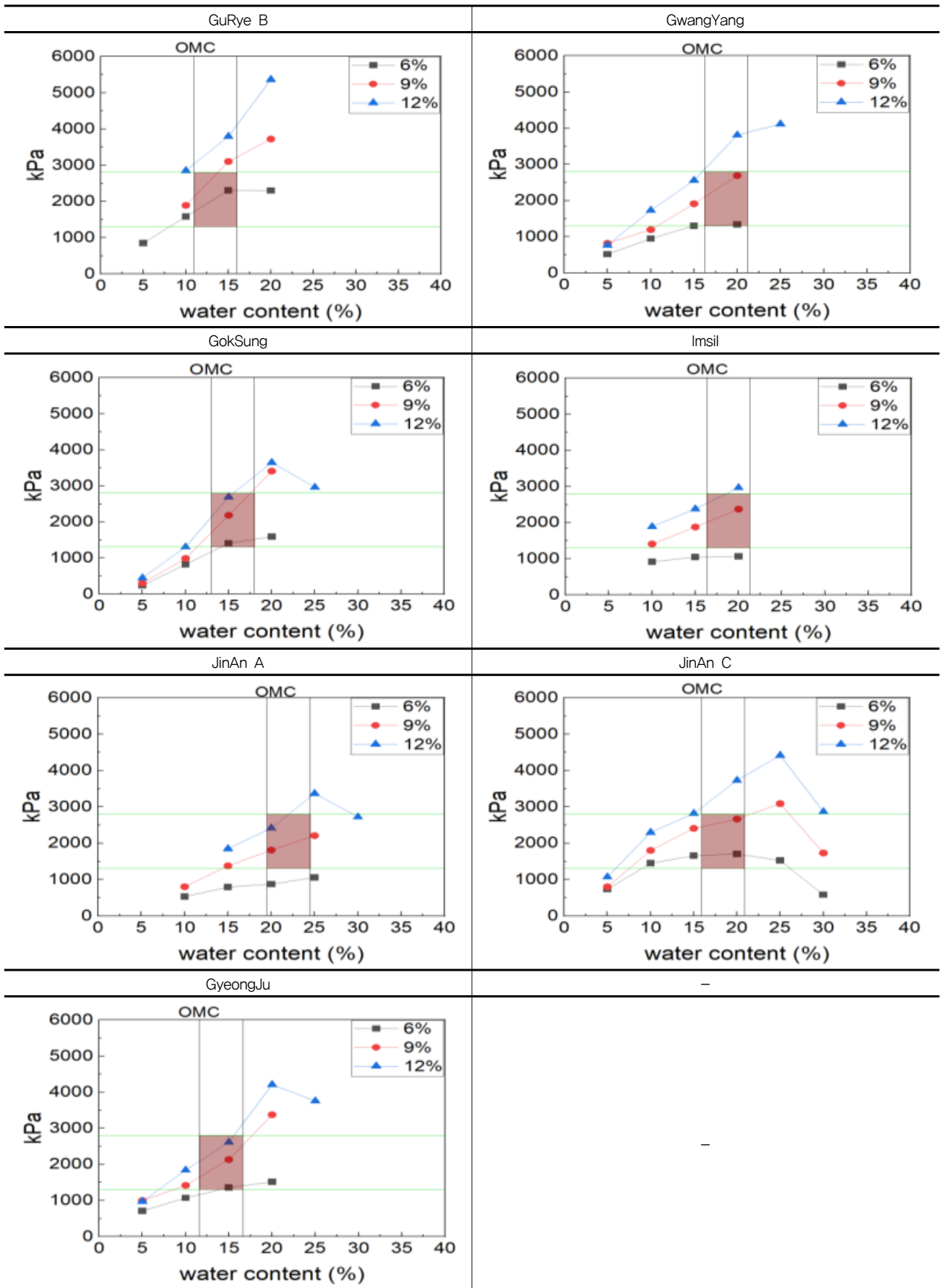


Fig. 5. Uniaxial compressive graph (Ground improvement content–water content) (Continued)

Table 4. Soil hardness tester penetration – Plants state (MOLIT, 2010)

Compressive strength (kPa)	Soil hardness tester penetration (mm)	Growth status by soil hardness
0 ~ 460	~ 18	Good plant growth, risk of slope collapse
460 ~ 1,300	18 ~ 23	Most suitable for root growth
1,300 ~ 2,800	23 ~ 27	Plant growth is good, growth activity is not very good
2,800 ~ 5,200	27 ~ 30	A condition in which it is difficult for the root system of a plant to invade

Table 5. Proposed by optimized ground improvement content ratio

Sample	DamYang A	DamYang B	JeonJu	Naju A	Naju B	Goryung A	Goryung B	Gurye A
Ground improvement content (%)	9	6	6	9	12	12	12	6
Sample	Gurye B	GwangYang	Goksung	Imsil	JinAn A	JinAn C	GyeongJu	-
Ground improvement content (%)	6	6	6	6	6	6	6	-

5.3 Casagrande법을 이용한 최적 배합비

현장 시료에 대하여 물리적 시험 결과를 토대로 통일 분류법(USCS)을 진행하였다. 우선 Casagrande법으로 구한 액·소성한계 값을 사용하였으며, 각 현장 별 최적 배합비를 확인하였다. 현장 별 배합비는 아래 Table 6과

같고, Fig. 6은 Casagrande법으로 흙을 종류별로 분류한 것이다. 이를 바탕으로 최적배합비를 제시한 결과는 Table 7에 나타내었다.

시험 결과 현장 시료 중 조립토의 경우 SM은 6%, SC는 6~9%로 나타났으며, SM은 한 가지 시험군만 존재하므로 추가적인 검증이 필요하다고 판단된다. 또한 SC

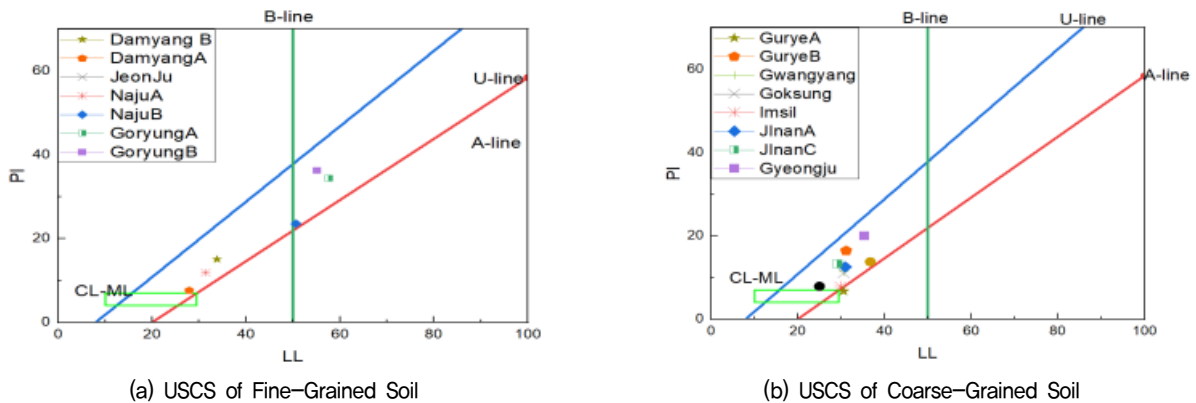


Fig. 6. USCS using the Casagrande method

Table 6. The mixing ratio according to the classification by Casagrande method

Mechanical analysis	Damyang A	Damyang B	Jeonju	Naju A	Naju B	Goryung A	Goryung B	Gurye A
Optimal Mixing Ratio (O.M.R) (%)	9	6	6	9	12	12	12	6
Mechanical analysis	Gurye B	Gwangyang	Goksung	Imsil	Jinan A	Jinan C	Gyeongju	-
Optimal Mixing Ratio (O.M.R) (%)	6	6	6	9	9	6~9	6~9	-

Table 7. Proposed Optimal Mixing Ratio by Casagrande method

Purpose Slope stabilization content Ratio (%)	Fine-Grained Soil	Coarse-Grained Soil
6%	CL	
9%	CL	SM, SC
12%	CL, CH	-

에 해당하는 경우 Imsil과 JinAn A의 현장에서는 9%로 나타났지만 나머지 현장에서는 6~9%의 배합비율로 나타나 최종적으로 SC는 9%로 제안하였다. 세립토 현장인 CL의 경우 6%, 9%, 12%로 다양한 최적 배합비가 나타났다. 이로 인해 세립토 현장은 지반개량제의 정확한 배합비를 제안하기에 명확하지 않았다. 이러한 이유는 앞서 언급 한 것과 같이 Casagrande법에 의한 토질의 공학적 분류 시 시험자의 숙련도에 따른 정확성이 주된 원인으로 파악된다. 그리하여 확실한 토질분류를 위하여 시험결과에 숙련도의 오차가 적은 원추관입시험법을 이용하여 흙의 분류를 실시해보았다.

#### 5.4 원추관입시험을 통한 최적 배합비

세립토의 공학적인 분류시에 Casagrande법은 매우 중요하지만 시험자의 숙련도에 의한 결과 값의 신뢰성 문제가 있다. 따라서 이를 해결하고자 Casagrande법의 대안으로 제시된 원추관입시험법을 사용하여 공학적 분

류를 다시 진행하였다. 각 현장의 배합비는 아래 Table 8과 같고, Fig. 7은 원추관입시험법으로 흙을 종류별로 분류한 것이다. 이를 바탕으로 최적배합비를 제시한 결과를 Table 9에 나타내었다.

원추관입시험으로 조립토를 분류해본 결과 GuRye A가 SM에서 SC로, ImSil이 SC에서 SM으로 분류가 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 이는 조립토의 분류에서 큰 비중을 차지하지 않기 때문에 처음 예상 설계 기준은 9%가 적합한 것으로 보인다.

반면 세립토 시료를 분류한 결과 눈에 띄는 차이를 보였다. ML의 경우 6%를, CL의 경우 9%, MH와 CH의 경우에는 12%로 나타나, 앞서 Casagrande법으로 분류한 결과에 비하여 명확하게 분류되었다. 비록 전체 시험군이 적어 표준적인 방법으로 제안하기에는 부족하나, 원추관입시험이 Casagrande법에 비해 시험자의 숙련도와 장비에 따른 오차가 적게 발생하여 세립토를 분류할 경우 활용하기에 적합한 것으로 판단되었다.

따라서 실제 현장에 지반개량제를 활용한 표층개량

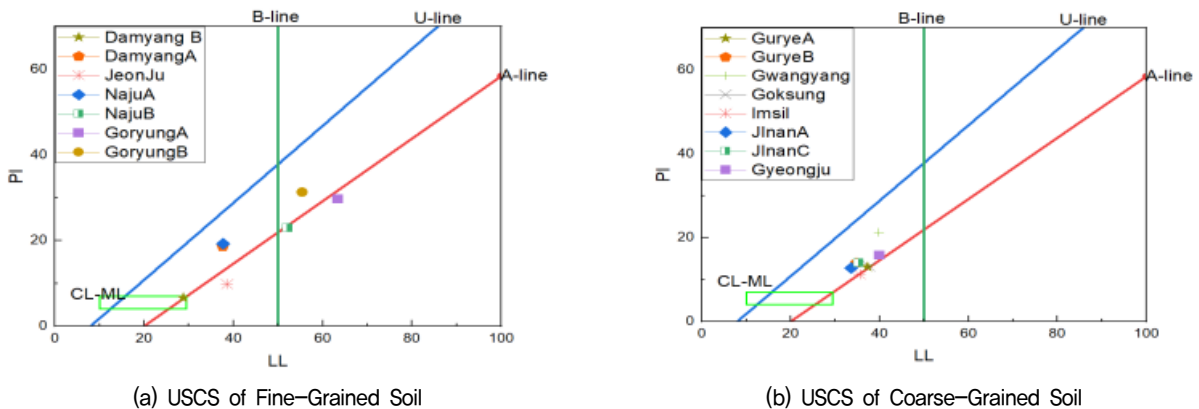


Fig. 7. USCS using the Fall Cone Test method

Table 8. The mixing ratio according to the classification by Fall Cone Test

Mechanical analysis	Damyang A	Damyang B	Jeonju	Naju A	Naju B	Goryung A	Goryung B	Gurye A
Optimal Mixing Ratio (O.M.R) (%)	9	6	6	9	12	12	12	6
Mechanical analysis	Gurye B	Gwangyang	Goksung	Imsil	Jinan A	Jinan C	Gyeongju	
Optimal Mixing Ratio (O.M.R) (%)	6	6	6	9	9	6	6	

Table 9. Proposed Optimal Mixing Ratio by Fall cone test method

Purpose Slope stabilization content Ratio (%)	Fine-Grained Soil	Coarse-Grained Soil
6%	ML	-
9%	CL	SM, SC
12%	MH, CH	-

공법 적용 시, 제시된 Table 9를 이용한다면 보다 현장에서의 활용성이 높을 것으로 판단된다. 하지만 이와 같이 제안한 최적 배합비를 활용하기 위해서는 시험군이 적다고 판단되어, 추가적으로 더 많은 현장의 시험군을 통한 검증이 필요하다 판단된다. 또한 현재 국내에선 원추관입시험법이 표준화 되어있지 않아 이를 Casagrande 법의 보조수단으로 활용한다면 보다 정확하고 빠른 흙의 분류가 가능하며 현장에서의 최적배합비의 사용에 있어 유리할 것으로 판단된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 붕괴된 15개소의 현장토를 대상으로 지반개량제를 활용하기 위한 최적 배합비를 제안함에 있어, Casagrande법과 원추관입시험법을 이용하여 각 시험법간의 액·소성한계의 상관관계와 정확도를 비교하였으며, 일축압축강도를 통하여 얻은 배합비를 바탕으로 흙의 공학적 분류를 통한 기준을 제시하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 지반개량제를 표층개량공법에 사용하기에는 토질 종류의 분류가 매우 중요하다고 판단된다. 흙의 분류 시 가장 중요하게 미치는 요소 중 하나가 액·소성한계이므로, 이에 맞춰 기존의 Casagrande법과 원추관입시험법을 비교하였다. Casagrande법(KS F 2303)을 이용하여 액·소성한계 시험을 수행 결과 원추관입시험(BS 1377)과 유사하거나 보다 높은 정확성을 보이는 결과값도 있었으나, 분산은 0.0347, 표준편차는 0.1863으로 원추관입시험(BS 1377)의 분산값인 0.0067, 표준편차 0.0821로서 원추관입시험법의 실험 결과가 더 신뢰도가 있다고 판단된다.

둘째, 이와 같은 결과를 나타낸 것은 자연 상태의 동적 시험방법인 Casagrande법의 시험 장치와 조제법, 시험자의 숙련도 등에 의해 오차로 인한 것으로 판단되며, 원추관입시험법이 Casagrande법을 완전히 대체할 수 없지만 정확한 액·소성한계 값을 알기 위해 병행하여 사용한다면, 보다 정확한 결과값을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

셋째, 병행하여 사용하기 위하여 얻어진 Casagrande 법에서의 액성한계와 원추관입시험법에서의 액성한계의 상관관계를 선형 문헌자료를 참고하여 기존의 Shibata et al.(1998)의 관계식과 비슷한  $LL_c = 0.8622LL - 10.105$

과  $PL_c = 0.5701LL + 12.322$  라는 방정식을 얻을 수 있었다. 그러나 15개의 시료만으로 얻어진 결과이므로, 시험군이 적다고 판단되어 이를 자료로 활용하기 위해서는 더 많은 시험군의 추가시험을 진행하여 신뢰성 검증을 통한 보완이 필요하다고 판단된다.

넷째, 지반개량제를 사용하는 표층개량공법은 지반의 개량을 통하여 무너진 사면이나 보호가 필요한 표층을 단기간에 고화시키고 지지력을 증가시키면서 안정화 시키는 것이 목적이다. 표층개량공법에서 기준 강도가 존재하지 않아, 본 연구에서는 식물생육이 원활한 강도인 1,300~2,800kPa의 강도를 기준으로 설정하여 일축압축강도시험을 실시한 결과 기준 강도를 만족하는 것을 확인할 수 있었다. 이때 지반개량제의 최적배합비를 산출하기 위하여 기준강도와 최적함수비, 그리고 최적함수비의 추가 5%의 선이 교차하는 영역에 해당하는 배합비를 최적배합비로 추정하는 방법을 제안하였다. 이에 Casagrande법(KS F 2303)으로 토질을 분류했을 경우에는 모래와 같은 조립토에서는 9%가 적합하였으며, 세립토의 경우에는 정확한 기준을 추정할 수 없었는데, 이는 시험 방법에서의 시험자의 숙련도 등에 의한 오차로 인한 것으로 생각되었다. 이러한 오차를 줄이기 위하여 원추관입시험(BS 1377)을 진행하였고, 결과적으로 최적배합비를 추정한 결과 조립토 뿐만 아니라 세립토의 경우 ML은 6%, CL은 9%, MH 및 CH는 12%가 적합한 것으로 나타났다.

## 참고문헌 (References)

1. Bhang, I. H. (2007), "A study on the technology related to the control and rehabilitation of slope surface erosion", Master Thesis, Jeonbuk National University. Jeonju, Korea.
2. British Standards Institute (1975), Methods of Test for Soils for Engineering Purposes, London.
3. Campos, L. F. A., Macedo, R. S., Kiyohara, P. K., and Ferreira, H. C. (1999), "Características de plasticidade de argilas para uso em cetâmica vermelha ou estrutural", *Ceramica* 45, pp.140-145.
4. CAN/BNQ (1986), Soils-Determination of Liquid Limit by the Swedish fall Cone Test Penetrometer Method and Determination of the Plastic Limit, Canadian Standards Association and Bureau de Normalization de Quebec, CAN/BNQ 2501-092-M-86.
5. Chung, Y. S., Yoon, M. B., and Kim, H. S. (2004), "On Climate variations and changes observed in South Korea", *Climatic Change Kluwer Academic Publishers*, pp.151-161.
6. Dragoni, W., Prosperini, N., and Vinti, G. (2008), "Some Observations on the Procedures for the Determination of the Liquid Limit: An Application on Plio-Pleistocenic Clayey Soils from Umbria Region", *Ital. J. Eng. Geol. Environ. Spec.*, pp.185-197.

7. Edil, T. B., Acosta, H. A., and Benson, C. H. (1993), "Stabilizing Soft Fine-Grained Soils with Fly Ash", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol.18, No.2, pp.283-294.
8. Expressway Corporation Specification (2021), "EXCS 11 73 20 : 2021", pp.2.
9. Feng, T.W. (2000), "Fall-Cone Penetration and Water Content Relationship of Clay", *Geotechnique*, Vol.50, No.2, pp.181-187.
10. Fredlund, D. G., Rahardjo, H. (1993), *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons Inc.
11. Hansbo, S. (1957), "A New Approach to the Determination of Clay by the Fall Cone Test, in Proceeding", *National Swedish Geotechnical Institute*, No.14, pp.5-47.
12. Harison, J. A. (1988) "Using the BS Cone Penetrometer for the Determination of the Plastic Limits of Soils", *Geotechnique*, Vol.38, No.3, pp.433-438.
13. Ishihara, K. and Koseki, J. (1989), "Cyclic Shear Strength of Finescontaining Sands", *Earthquake Geotechnical Engineering, Proceedings of the Discussion Session on Influence of Local Conditions on Seismic Response*, 12th ICSMFE, Rio de Janeiro, Brasil, pp.101-106.
14. Jason, Y. W., Kaiming, H., and Munira, S. (2017) "Remediation of Slope Failure by Compacted Soil-Cement Fill", *American Society of Civil Engineers*, Vol.31, No.4, pp.04017022-1-9.
15. Kang, D. H., Kim, Y. S., Hwang, I. T., and Kim, J. H. (2021), "A Study on Soil Improvement Agent for Rainfall-Induced Erosion on the Soil Slope", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.41, No.3, pp.237-246.
16. Kim, C. K., Yeo, J. S., Moon, Y. S., Park, H. Y., and Kim, T. H. (2017), "Liquid and Plastic Limits of Cohesive Soil by Static and Dynamic Test Methods and Tester", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.33, No.3, pp.5-15.
17. Kim, J. H., Park, S. W., Jeong, S. S., and Yoo, J. H. (2002), "A Study of Stability Analysis on Unsaturated Weathered Slopes based on Rainfall-induced Wetting", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.18, No.2, pp.123-136.
18. Kim, M.A. (2005), A Study on Liquid Limit and Plastic Limit of Cohesive Soil in Western Gyengnam by Fall Cone Test, Master Thesis, *Gyeongsang National University*, pp.1-11.
19. Lim, H.-M. (2014), "A Study on Consolidation Characteristics of Remolded Clay due to the Liquid Lim", *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol.15, No.5, pp.67-74.
20. Littleton and Farmilo, (1977), Some observations on liquid limit values with reference to penetration and Casagrande tests *Ground Eng.*, Vol.10, No.4, pp.111-118.
21. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2016), Standard for slope stability design (in Korean).
22. Molit (2009), "11-1611000-000503-01", pp.80.
23. Moon, C. F. and White, K. B. (1985), "A Comparison of Liquid Limit Test Results", *Geotechnique*, pp.35.
24. Nagaraj, T.S. and Jayadev, M.S. (1981), "Re-Examination of OnPoint Method of Liquid Limit Determination", *Geotechnique*, Vol.31, No.3, pp.413-425.
25. Sherwood, P.T. and Riley, M.D. (1970), "An Investigation of ConePenetrometerMethod for Liquid Limit", *Geotechnique*, Vol.20, pp.203-208.
26. Shibata, T., Nishihara, A., Fujii, T., and Ohnishi, M. (1998), "A study on measuring method of the liquid limit of clays", *The memoirs of the faculty of engineering. Fukuyama Univ.*, pp.31-38.
27. Shimobe, S. and Spagnoli, G. (2019), "A Global Database Considering Atterberg Limits with the Casagrande and Fall-cone Tests", *Engineering Geology*, Vol.260, 105201.
28. Son, M. R. (2016), "Study on the Measurement of Liquid Limit Using a Penetration Resistance of Small Cone in Clay Soil", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.10, pp.5-15.
29. Sowers, G. F., Vesic, A., and Grandolfi, M. (1960), "Penetration Tests for Liquid Limit", *ASTM Special Technical Publication*, No.254, pp.216-224.
30. Vasilev, A.M. (1949), *Basic Principles of the Methods and Techniques of Laboratory Determination of Physical Soil Properties*, Referred by somers et al.
31. Wood, D.M. and Wroth, C.P. (1978), "The Use of the Cone Penetrometer to Determine the Plastic Limit of Soils", *Ground Engineering*, Vol.11, No.3, pp.37.

Received : November 22<sup>nd</sup>, 2022

Revised : February 5<sup>th</sup>, 2023

Accepted : February 19<sup>th</sup>, 2023