

## 연직배수공법 시공단계별 연약지반의 공학적 특성변화 분석

# The Variation of Engineering Characteristics of Soft Ground with Construction Step of Vertical Drains

정하익<sup>1)</sup>, Ha-Ik Chung, 정길수<sup>2)</sup>, Gil-Soo Chung, 이용수<sup>1)</sup> Yong-Soo Lee, 진규남<sup>3)</sup>, Kyu-Nam Jin, 이재식<sup>4)</sup>, Jae-Sik Lee

<sup>1)</sup> 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, KICT

<sup>2)</sup> 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원, Researcher, KICT

<sup>3)</sup> 한국토지공사 연구개발처 주임연구원, Associate Researcher, Korea Land Corporation

<sup>4)</sup> 한국토지공사 시험연구실 대리, Assistant manager, Korea Land Corporation

**SYNOPSIS** : This study concerns with the variation of engineering characteristics of soft ground under embankment treated vertical drains. The derived engineering characteristics can be used in the prediction of increased strength of soft ground treated with vertical drains. The variations of physical properties such as liquid limit, natural water content, void ratio, and dry unit weight, and mechanical properties such as strength, preconsolidation ratio, compressibility are analysed and suggested. The co-relation of physical properties and mechanical properties with installation of vertical drains in soft ground are derived in this study.

**KEYWORDS** : soft clay, vertical drains, embankment, consolidation, engineering characteristics,

## 1. 서론

연약지반에 개량공법을 적용하게 되면 압밀 및 침하가 발생하여 연약지반의 공학적특성이 변화하게 된다. 본 연구에서는 연약지반 개량공법 중에서 페이퍼드레인, 팩드레인 및 메나드드레인의 연직배수공법의 적용에 따른 시공단계별 기초연약지반의 물리적 및 역학적 특성변화를 살펴보았다. 이를 위하여 연구대상구간에 대하여 시험성토 각 위치별로 실시된 실내 및 현장시험 결과를 분석하여 연직배수재 타설전 원지반, 연직배수재 타설 후, 1차 성토후 및 2차 성토후의 연직배수공법에 의한 연약지반 처리단계에 따른 대상지반의 공학적 특성 변화를 분석하였다. 또한 연직배수재와 성토하중을 이용하여 연약지반을 개량함에 있어 시공단계에 따른 장기적인 압밀특성변화를 규명하기 위하여 시험시공과정에서 시공단계별로 실시된 표준압밀시험, Rowecell 압밀시험 그리고 피에조콘을 이용한 간극수압소산시험(CPTU) 결과를 분석하였다.

특히, 본 논문에서는 연직배수재 타설전의 원지반, 연직배수재 타설후, 1차 5m 성토후, 2차 8m 성토후의 연약지반 처리단계로 실시된 현장 및 실내시험 결과를 이용하여 연약지반 처리단계별로 지반의 물리적 및 역학적 특성의 상관관계를 구하였다.

## 2. 시험성토체 및 시료채취 위치

연구대상인 양산물금 시험성토구간에 대하여 그림 1에 나타낸 바와 같이 시험성토 각 위치별로 실시

된 실내시험 결과를 분석하여 연직배수재 타설전 원지반, 연직배수재 타설후, 1차 성토후 및 2차 성토후의 연직배수공법에 의한 연약지반 처리단계에 따른 대상지반의 공학적(물리적, 역학적) 특성 변화를 분석하고자 한다.

### 3. 물리적 특성

흙의 물리적 특성을 파악하기 위한 시험은 비교적 간단한 시험으로 그 결과를 얻을 수 있고, 그 결과의 효용성도 높다. 또한, 물리적 특성은 흙을 분류하는데 직접적으로 사용되고 있으며, 유효상재압의 파악에 필요한 흙의 단위중량을 계산하는데 이용될 뿐만 아니라 역학적 특성을 파악하는데도 중요한 의미를 지닌다.

#### 3.1 액성한계

그림 2은 연직배수공법에 의한 연약지반 개량 시공단계별로 깊이에 따른 액성한계의 변화를 나타낸 것이다. 전체적으로 액성한계는 28.7~63.8%의 분포를 나타내고 있지만, 깊이 5~15m구간의 액성한계가 43~65%의 범위로 가장 크게 나타내고 있다.

또한 액성한계와 유기물함량의 관계를 살펴보면 한국토지공사(1999)에서 기술된 유기물의 함량관계에서도 깊이 5~15m구간의 유기물 함량이 많게 나타났으며, 그림 2에서도 액성한계가 5~15m구간에서 크게 나타난 것으로 보아 유기물함량이 많으면 액성한계가 큰 것으로 판단할 수 있다.

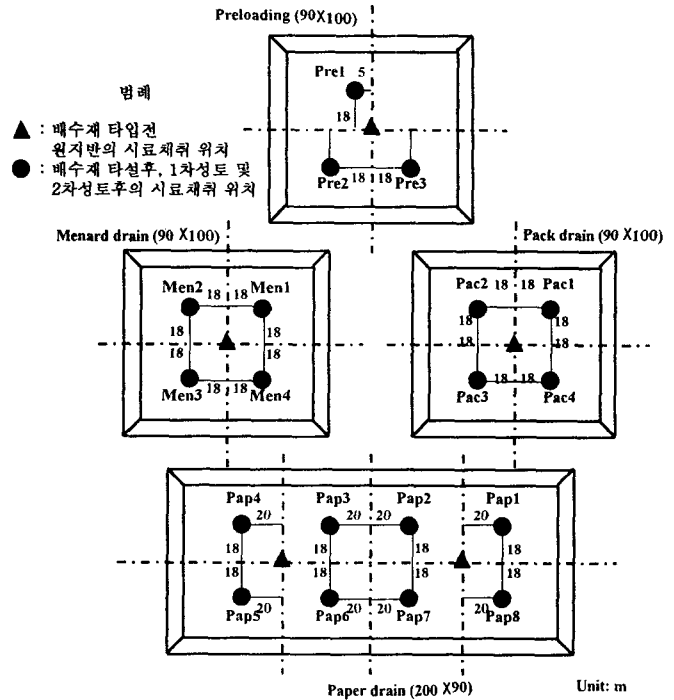


그림 1. 시험성토체 크기 및 시료채취 위치 (1996, 한국토지공사)

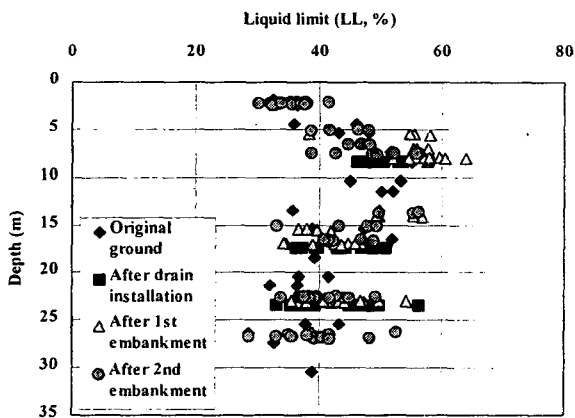


그림 2. 연약지반 처리단계에 따른 심도별 액성한계의 분포

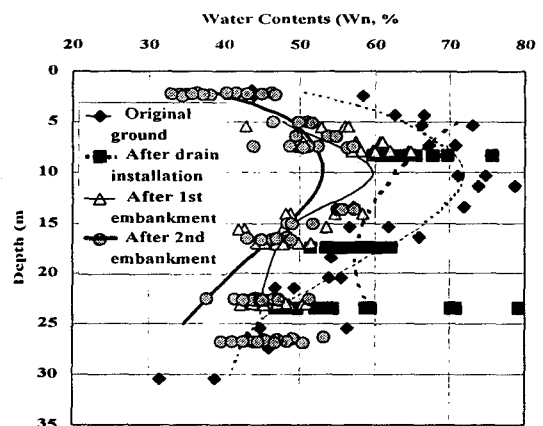


그림 3. 연약지반 처리단계에 따른 심도별 자연함수비의 분포

### 3.2 자연함수비

그림 3은 불교란시료 채취를 통해 측정한 연약지반개량 처리단계별로 변화되는 자연함수비 결과를 보여주고 있다. 자연함수비는 앞서 언급한 액성한계시험 결과와 마찬가지로 지표에서부터 심도가 증가할수록 함수비가 증가하다가 10m를 전·후하여 최대치를 보이며 이후 감소하는 경향을 보인다. 일반적으로 압밀이 진행되면서 과잉간극수압의 소산이 이루어지는데, 이 과정에서 배수재를 통한 간극수의 배수가 진행되면서 함수비 변화가 발생된다. 연약지반 처리단계별로 위치에 따라 심도별로 3개의 불교란 시료를 채취하여 실내실험을 실시하였기 때문에, 상부(5.0~8.4m), 중부(15.0~17.5m), 하부(21.4~23.4m)로 나누어 동일한 위치와 심도에서 연약지반 처리단계에 따른 함수비 변화를 분석하였다. 분석결과 상부와 중부의 경우 시공단계에 따라 함수비가 감소하는 경향을 보이며 하부의 경우 연직배수재 타설이후에 다소 증가하다가 이후 1차 성토와 2차 성토단계에서는 압밀배수에 의해 함수비가 감소하는 경향을 보인다. 이 분석에 의하면 하부지반보다는 상부지반에서 함수비 감소변화가 큰 것으로 나타났는데 이는 상부층 침하량이 증가하여 간극수의 배수량이 많아졌기 때문이다.

### 3.3 간극비

그림 4은 연약지반 처리단계에 따른 심도별 간극비 분포곡선으로서 지표 부근과 30m 심도 부근에서 최소치를 보이며 5~15m 구간에서 최대치를 보인다. 전체 심도에 대한 연약지반처리 단계별 간극비 변화를 정리한 결과 배수재 타설전 보다는 타설후의 간극비가 큰 것으로 나타났으며, 이후 1, 2차에 걸쳐 성토작업이 진행되면서 대상지반의 간극비는 감소하는 경향을 보인다. 이는 성토하중에 의해 압밀이 진행될 때 간극수가 배출되면서 체적이 감소하는데, 이러한 체적변화는 토립자의 변화보다는 간극비 변화에 의한 것임을 알 수 있다. 이와같이 배수재와 성토하중에 의해 압밀이 진행되면서 2차 성토후 간극비는 시공전보다 약 22%가량 감소하는 것으로 나타났다.

심도에 따른 연약지반 처리단계별 간극비 변화에서 보는 바와같이 상부와 하부층에서는 연직배수재 타설후 간극비가 다소 증가하며 이후 1차 성토와 2차 성토단계로 갈수록 압밀진행에 따라 함수비가 감소하는 것으로 나타났다. 또한 중부층의 경우 시공단계에 따라 압밀이 진행되면서 간극비가 지속적으로 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

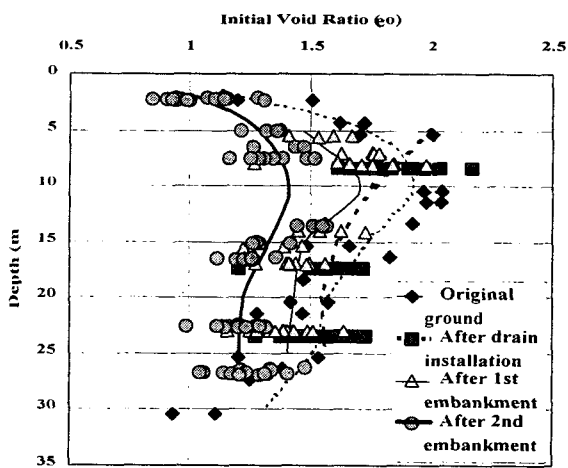


그림 4. 연약지반 처리단계에 따른 심도별 간극비의 분포

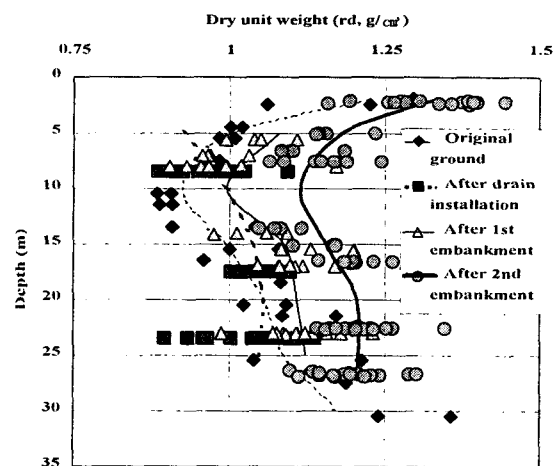


그림 5 연약지반 처리단계에 따른 심도별 건조단위중량의 분포

### 3.4 건조단위중량

그림 3.2.8은 연약지반 처리단계에 따른 심도별 건조단위중량 분포를 보인다. 그림에 의하면 건조단위중량의 변화는  $0.90\sim 1.46\text{g/cm}^3$ 의 범위로 나타나고 있으며, 건조단위중량은 심도 5~15m구간에서 작게 나타나고 지표와 심도 30m 부근에서 크게 나타나는 경향을 보인다. 이는 앞에서 언급된 간극비 변화 특성으로 설명될 수 있는데, 심도 5~15m 부근에서 간극비가 크게 나타나고, 지표와 심도 30m 부근에서 간극비가 작게 나타났기 때문이다.

연약지반 처리단계별로 건조단위중량 변화특성을 살펴보면 배수재 타설전보다는 타설후의 단위중량이 감소하다가 성토단계가 1차, 2차로 진행되면서 단위중량이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 앞서 언급한바와 같이 간극비 변화 특성으로부터 설명되어질 수 있다. 심도별로 산정한 처리단계별 건조단위중량 변화를 살펴보면 시공단계에 따른 건조단위중량 변화는 간극비 변화경향과 반대되는 경향을 보이는 데, 이는 건조단위중량은 간극비에 함수 의존적인 경향을 보이기 때문에 압밀이 진행되면서 간극비가 감소함에 따라 건조단위중량은 상대적으로 증가하는 경향을 보인다.

### 3.5 시공단계별 물리적 특성의 변화율

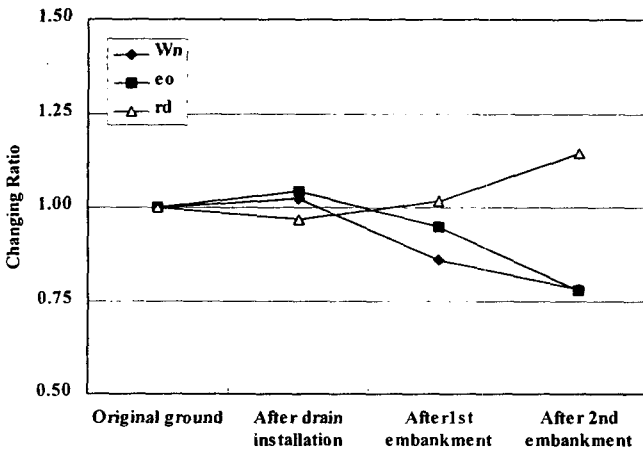


그림 6. 연약지반 처리단계별 전체심도에 따른 지반의 물리적 특성 변화율

앞서 분석된 결과를 이용하여 연직배수공법에 의한 연약지반처리 시공단계별 전체심도에 대한 물리적 특성 변화율을 분석하였으며 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 시공단계별 함수비 변화율은 그림에서 보는 바와 같이 드레인 타설후 교란에 의해 초기에 비해 1.02배 증가하며 이후 압밀이 진행되면서 간극수 배수에 의해 0.78배까지 감소하는 경향을 보인다. 또한 간극비도 드레인 타설 직후 교란에 의해 간극비가 1.04배 증가하며 이후 압밀이 진행되면서 0.78배까지 감소하는 경향을 보인다. 그리고 건조단위중량의 경우 드레인 타설직후 교란에 의해 0.97배 감소하며 이후 압밀이 진행에 따른 간극비 감소로 인하여 1.14배까지 증가하는 경향을 보인다.

## 4. 역학적 특성

### 4.1 강도특성

그림 7은 연약지반 처리단계별로 얻은 일축압축강도( $q_u$ )를 기준으로 산정한 심도별 비배수 전단강도( $S_u = q_u/2$ ) 변화를 나타내며, 그림 8은 삼축압축시험에 의해 산정된 점착력( $c_u$ )에 의해 산정된 비배수 전단강도( $S_u = c_u$ ) 변화를 나타낸다. 그림에서 보는바와 같이 전단강도는 심도가 깊어질수록 비교적 선형적으로 증가하는 경향을 보인다. 또한 배수재 타입후 지반교란에 의해 전단강도가 작아지며 이후 성토하중에 의해 압밀이 진행되면서 전단강도는 증가하는 경향을 보인다. 연약지반처리 시공단계별로 전단강도 변화를 살펴보면, 배수재타설후 지반의 전단강도는 지반교란에 의해 원지반에 비해 약 0.66~0.97배 감소하며, 이후 1차 성토에 의해 전단강도는 초기에 비해 약 1.02~1.44배 증가하였으며 2차 성토이후에

는 1.15~2.23배 증가하는 것으로 나타나, 압밀이 진행되면서 비배수강도도 증가함을 알 수 있다. 각각의 심도별로 산정한 시공단계별 전단강도 변화를 살펴보면, 배수재 타설후 지반교란에 의해 전단강도가 감소하다가 이후 성토하중에 의해 지속적으로 증가하는 경향을 보인다. 또한 2차 성토단계 하부층의 경우 원지반에 비해 전단강도가 8.3배 증가하는 것으로 나타났는데 이러한 경우는 지반의 불균질성에 의한 차이가 발생한 것으로 추정된다.

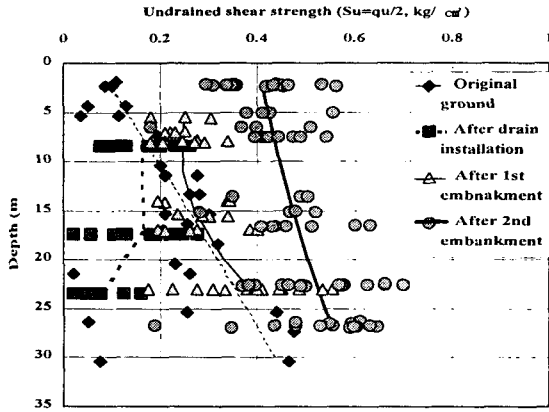


그림 7. 연약지반 처리단계에 따른 심도별  $S_u (= q_u/2)$ 의 분포

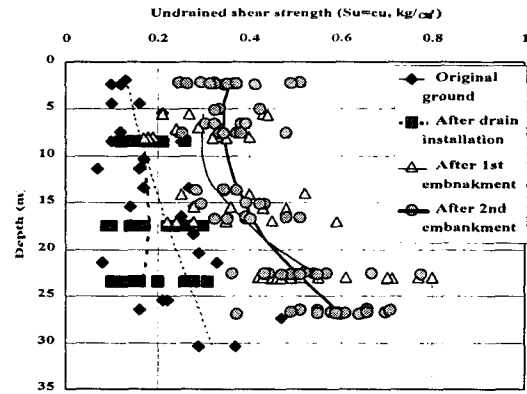


그림 8. 연약지반 처리단계에 따른 심도별  $S_u (= c_u)$ 의 분포

#### 4.2 선형압밀하중( $P_c$ )

그림 9은 연직배수공법에 의한 연약지반처리 시공단계에 따른 심도별 선형압밀하중 분포를 나타낸다. 선형압밀하중은 드레인 타설전 초기단계에서는 0.25~2.30 kg/cm<sup>2</sup>의 범위로 심도에 따라 비교적 선형적인 경향으로 보이며, 배수재 타입후 지반교란에 의해 선형적인 경향이 완만하게 나타나며, 평균값에 의한 변화율은 0.95로 감소하게 된다. 또한 1차 성토단계에서는 압밀이 진행되면서 배수재 타설전에 비해 선형압밀하중이 약 1.39배 증가하며, 2차 성토단계에서는 약 2.01배의 선형압밀하중이 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같이 시공단계에 따라 선형압밀하중이 증가하는 것은 앞서 언급된 바와 같이 압밀이 진행되면서 간극비가 감소하고 단위중량이 증가하면서 강도가 증가하는 것에서 설명되어 질 수 있다.

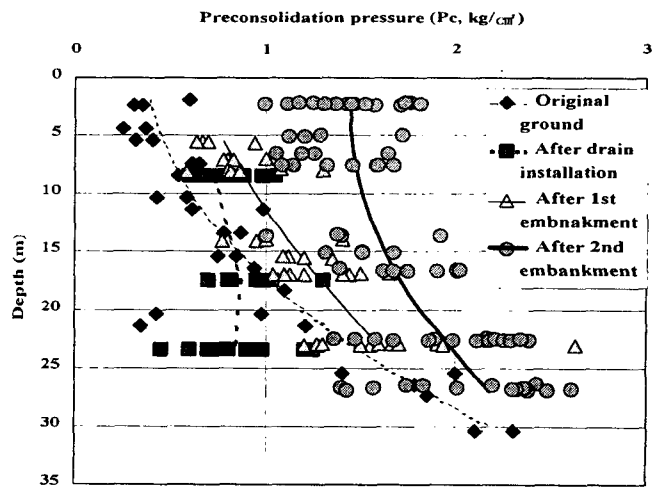


그림 9. 연약지반 처리단계에 따른 심도별 선형압밀하중( $P_c$ )의 분포

각각의 심도별로 산정한 시공단계별 선형압밀하중 변화를 살펴보면, 압밀이 진행되면서 선형압밀하중도 증가하는 경향을 보이며, 성토하중에 의한 응력증가량이 큰 상부층에서 선형압밀하중 변화량이 크게 나타남을 알 수 있다.

#### 4.3 압축특성

그림 10~12은 연직배수공법에 의한 연약지반 처리단계별로 실시된 압밀시험에 의해 산정된 압축지수( $C_c$ ), 이차압축지수( $C_{\alpha}$ ), 팽창지수( $C_s$ )의 심도별 결과를 나타내며, 물리적 특성에서와 같이 지표에서

심도가 증가할수록 증가하다가 심도 10m부근에서 최대치를 보이며 이후 감소하는 경향을 보인다.

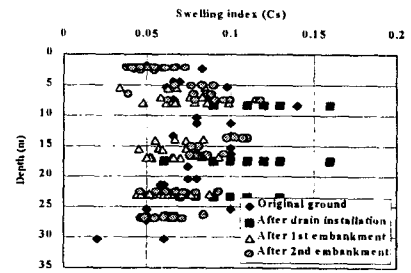
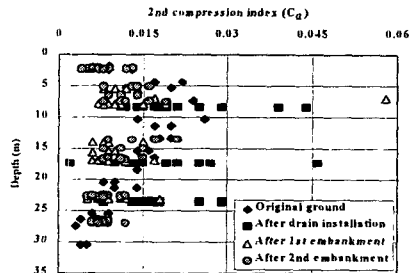
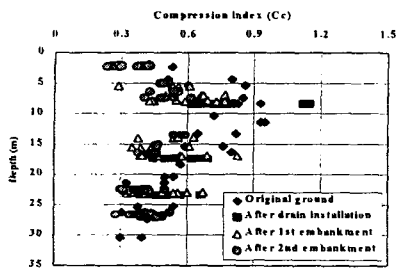


그림 10. 심도별 압축지수의 분포

그림 11. 이차압축지수의 분포

그림 12. 심도별 팽창지수의 분포

#### 4.4 시공단계별 역학적특성 변화율

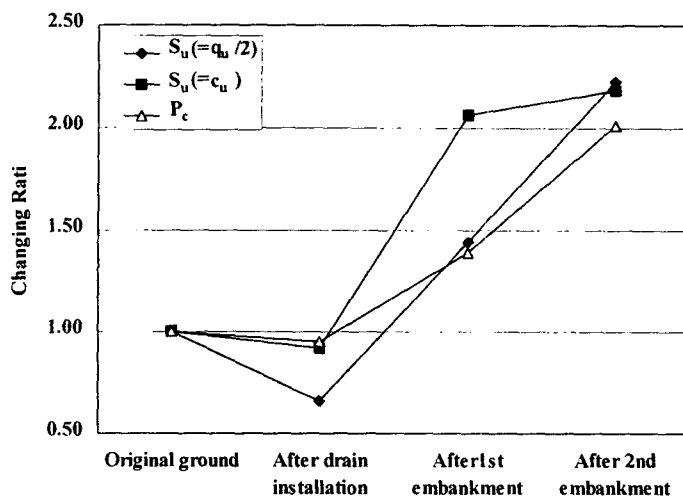


그림 13. 연약지반 처리단계별 전체심도에 따른 지반의 역학적 특성 변화율

앞서 분석된 결과를 이용하여 연직배수 공법에 의한 연약지반처리 시공단계별 전체 깊이에 대한 역학적 특성 변화율을 분석하였으며 그 결과를 그림 13에 나타내었다. 일축압축강도에 의해 결정된 비배수전단강도 ( $q_u/2$ )의 변화율은 그림에서 보는 바와 같이 드레인 타설후 교란에 의해 초기에 비해 0.66배 감소하며 이후 압밀이 진행되면서 2.23배까지 증가하는 경향으로 보인다. 또한 삼축압축시험에 의해 결정된 비배수전단강도의 경우 드레인 타설직후 교란에 의해 0.92배 감소하며 이후 압밀이 진행되면서 2.18배까지 증가하는 경향을 보인다. 그리고 선형압밀하중의 경우 드레인 타설직후 교란에 의해 0.95배 감소하며 이후 압밀이 진행에 따른 물성의 공학적 안정화와 강도증가로 인하여 2.01배까지 증가하는 경향을 보인다.

다.

#### 5. 물리적 특성과 역학적특성과의 상관관계

그림 14~16은 연약지반처리 시공단계별로 압축지수 ( $C_c$ )와 액성한계(LL), 초기간극비( $e_0$ ), 함수비( $w_n$ )의 관계를 나타내며, 그림에서 보는 바와 같이 압밀이 진행됨에 따라 간극비, 자연함수비 등이 감소함에 따라 압축성이 저하되는 경향을 보인다. 압축지수와 물리적 특성과의 상관관계는 다음과 같다.

$$C_c = 0.012(LL - 2.1) \quad (1)$$

$$C_c = 0.013(w_n - 13.2) \quad (2)$$

$$C_c = 0.45(e_0 - 0.31) \quad (3)$$

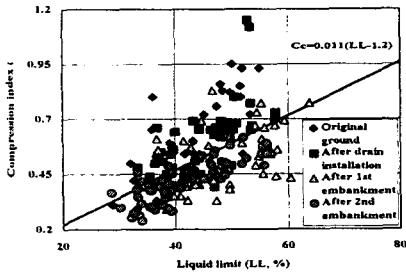


그림 14. 압축지수-액성한계 상관관계

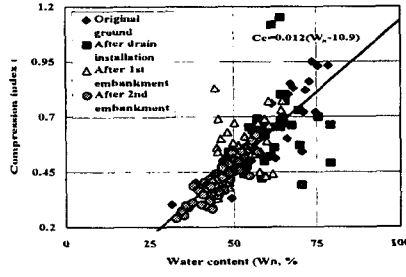


그림 15. 압축지수-자연함수비 상관관계

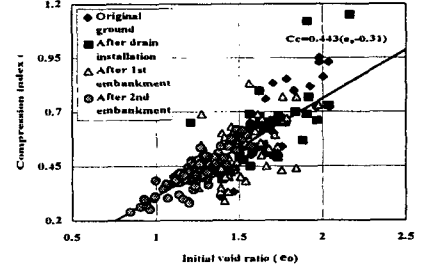


그림 16. 압축지수-초기간극비 상관관계

그림 17은 연약지반 처리단계에 따른 활성도와 팽창지수와와의 상관관계를 나타낸 것으로, 활성도가 클수록 흙의 팽창성도 증가하는 하는 것으로 나타났다. 또한 배수재 타설과정에서 교란이 발생한 것으로 추정되는 드레인 타설후 시험결과를 제외한 나머지 시공단계에서 팽창지수와 활성도 관계는 비교적 상관성이 높은 것으로 나타나며, 드레인 타설후 시험결과를 제외하고 회귀분석을 실시한 결과 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$C_s = 0.278A \quad (4)$$

그림 3.3.11은 압축지수와 이차압축지수의 관계를 나타내며 그림에서 보는 바와 같이 압축지수가 클수록 이차압축지수도 큰 것으로 나타났으며, 상관관계를 분석한 결과 다음과 같은 관계식을 보인다.

$$C_o = 0.023C_c \quad (5)$$

그림 3.3.12는 연약지반 처리단계에 따른 압축지수와 팽창지수의 관계를 나타내며 그림에서 보는 바와 같이 압축지수가 클수록 팽창지수도 큰 것으로 나타났다. 압축지수와 팽창지수의 상관관계는 다음과 같다.

$$C_s = 0.138C_c \quad (6)$$

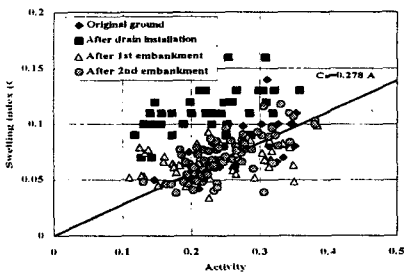


그림 17. 팽창지수-활성도 상관관계

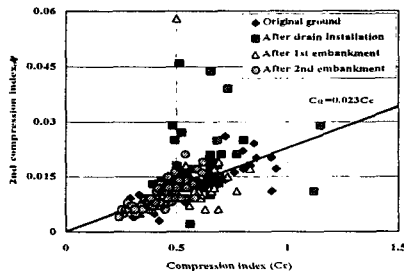


그림 18. 압축지수-이차압축지수 상관관계

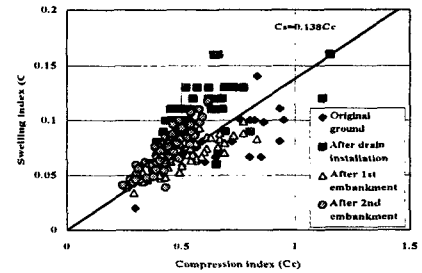


그림 19. 압축지수-팽창지수 관계곡선

## 6. 결론

연직배수공법에 의한 연약지반 처리단계에 따라 양산물금 점토에 대하여 얻은 일련의 실험 및 자료를 통하여 공학적 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 양산물금 점토의 물리적 특성 분석 결과,  $75\mu\text{m}$ 이하의 입도분포는 전체적으로 85%~99%의 범위이고, 표층(10m이내)과 심층(25m이하)에서 입도분포의 범위가 85~99%의 범위를 보이고 있으며, 중간깊이에서는 95%이상의 입도분포를 나타내고 있다. 비중은 2.61~2.75의 분포를 나타내고 있으며, 평균적으로 2.68을 보이고 있다. 또한, 액성한계, 소성지수, 활성도, 함수비, 간극비는 깊이 10m구간에서 최대값을 보이고 있으며, 10m이하의 깊이에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 건조단위 중량은 깊이 10m구간에서 최소값을 나타내고 있으며 10m이하의 깊이에 따라 증가하는 것으로 나타났다.
- (2) 연직배수공법에 의한 연약지반처리 시공단계별 전체심도에 대한 물리적 특성 변화율을 분석한 결과, 시공단계별 함수비 변화율은 드레인 타설후 교란에 의해 초기에 비해 1.02배 증가하며 이후 압밀이 진행되면서 간극수 배수에 의해 0.78배까지 감소하는 경향을 보인다. 또한 간극비도 드레인 타설 직후 1.04배 증가하며 이후 압밀이 진행되면서 0.78배까지 감소하는 경향을 보인다. 그리고 건조단위중량의 경우 드레인 타설직후 0.97배 감소하며 이후 압밀이 진행에 따른 간극비 감소로 인하여 1.14배까지 증가하는 경향을 보인다.
- (3) 양산물금 점토의 역학적 특성 분석 결과, 압축지수( $C_c$ ), 이차압축지수( $C_a$ ), 팽창지수( $C_s$ )는 깊이 10m구간에서 최대값을 보이고 있으며, 10m이하에서 점점 감소하는 것으로 나타났다.
- (4) 연직배수공법에 의한 연약지반처리 시공단계별 전체깊이에 대한 역학적 특성 변화율을 분석한 결과, 일축압축강도에 의해 결정된 비배수전단강도( $q_u/2$ )의 변화율은 드레인 타설후 교란에 의해 초기에 비해 0.66배 감소하며 이후 압밀이 진행되면서 2.23배까지 증가하는 경향으로 보인다. 또한 삼축압축 시험에 의해 결정된 비배수전단강도의 경우 드레인 타설직후 0.92배 감소하며 이후 압밀이 진행되면서 2.18배까지 증가하는 경향을 보인다. 그리고 선형압밀하중의 경우 드레인 타설직후 0.95배 감소하며 이후 압밀이 진행되면서 2.01배까지 증가하는 경향을 보인다.
- (5) 연약지반 처리단계에 따른 점토의 압축지수( $C_c$ ), 팽창지수( $C_s$ ), 이차압축지수( $C_a$ ), 액성한계(LL), 초기간극비( $e_0$ ), 자연함수비( $w_n$ )의 상관관계는  $C_c=0.012(LL-2.1)$ ,  $C_c=0.13(Wn-13.2)$ ,  $C_c=0.45(e_0-0.31)$ ,  $C_s=0.278A$ ,  $C_a/C_c=0.023$ ,  $C_s/C_c=0.138$ 로 나타났다.

## 참고문헌

1. 한국건설기술연구원(1999), “해안공간을 위한 연약지반 처리기술”
2. 한국토지공사(1999), “연약지반의 압밀특성에 관한 연구·I”
3. 한국토지공사(1996), “연약지반의 처리공법과 침하예측에 관한 연구-양산물금 연약지반 시험시공”, No. 연구96-7-22, 한국토지공사 토지연구원