

## 불포화토의 역학적 특성을 이용한 다짐토의 항복응력의 산정방법 A Estimate Method of the Consolidation Yield Stress in Compacted soil using the Mechanical Characteristics of Unsaturated soil

김은라<sup>1)</sup>, Eun-Ra Kim, Atsushi Iizuka<sup>2)</sup>, 김유성<sup>3)</sup> Kim, you-seong

<sup>1)</sup> 전북대학교 토목공학과 공업기술연구센터 연구원, Researcher, Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National University

<sup>2)</sup> 코베대학교 도시안전센터 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Kobe University

<sup>3)</sup> 전북대학교 토목공학과 부교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National University

**SYNOPSIS** : This paper introduces a method of predicting the behavior of compacted soil with an unsaturated soil mechanics by considering the effect of suction as an increasing consolidation yield stress. Two kinds of experiments were conducted. One is a series of static compaction tests to monitor the suction, and the other is a series of compression tests on compacted soil without soaking. The results of our tests indicate that it is possible to derive the distribution of suction on compaction curves and to hypothesize the changes in void ratio in the compression tests that depends on the suction. In addition, a new method is proposed to estimate the consolidation yield stress of compacted soil with a simple chart including compaction curves.

**Key words** : Compacted soil, Matric suction, Consolidation yield stress

### 1. 서 론

도로 성토, 보강토 및 옹벽의 뒷채움 등 대부분의 지반구조물은 다짐토를 재료로 시공되고 있다. 다짐토의 다짐관리에 대한 연구로 가장 많이 이용되고 있는 방법은 「Proctor의 다짐관리법」으로 초기에 Proctor(1933)는 Proctor Needle을 이용하여 흙의 관입저항 값을 구하여, 흙의 특성곡선을 작성 현장 다짐토의 공학적 성질을 추정하도록 하였다. 또, Proctor는 실내다짐시험을 가상 실험레이션을 이용, 지금까지 경험적으로 실시했던 현장 다짐에 대해서 현대의 다짐 기본원리(다짐곡선과 최적함수비의 개념)에 기초로 한 합리적인 다짐관리 방법을 제안하였다. 그러나 Proctor의 방법은 많은 노력과 비용을 요하는 현장 다짐시험을 필요로 하는 것으로, 현재에는 실내시험방법만이 넓게 이용되고 있으며, 현재의 [D값(성토의 건조밀도/실내다짐시험에 의한 최대건조밀도)] 관리와 같은 흙의 다짐도만으로 구조물의 안전도를 평가하는 것으로 되어 있어, 흙의 공학적 성질에의 접근이 희박하게 된다. 이에 Seed and Chan(1959)은 3종류의 다짐 방법이 다른, 같은 건조밀도·함수비의 다짐 공시체를 제작하여 전단 특성을 비교한 결과 다짐방법에 의한 강도특성이 다르다는 것을 나타내었다. 그러나 실내시험 결과를 그대로 현장에 적용하지 않고 실내 및 현장시험에 의해 얻을 수 있는 흙의 공학적성질의 직접적인 상관을 취급함으로써 이러한 문제를 회피하였다. 다짐토의 압축시험은 다짐 상태보다 압밀 항복응력을 산정하는 방법으로 Ohta and Hata(1977)는 실트질흙에 등체적일면전단 시험을 실시하여 그 압축항복응력과 강도 특성을 상세하게 조사하여 체계화 시켰다. 그 결과 함수비마다 다른 압축특성으로 정리 되어 등체적

전단 강도는 함수비·간극비에 관계없이 선행압밀압력에 의해 결정되었다. 또 Ohta et al.(1986)는 건조밀도로 압축곡선을 표시, 다짐관리방법을 제안 하였다. 그러나 다짐토는 간극에 물과 공기를 포함한 불포화토로 포화토 보다는 압축지수, 투수계수는 작고, 보다 안전한 재료로서 유용하게 사용되어지고 있다. 그러나 이런 불포화토는 강우나 지하수의 변동에 의한 외수위의 영향을 크게 받으며 변형률의 축적과 같이 본래의 품질을 유지 하고 있는지 검토가 필요로 한다. 이 거동은 불포화토 특유의 응력성분인 매트릭 흡인력(matric suction, 이하 흡인력으로 표기함)의 효과를 고려하는 것으로 표현가능하다 (Karube and Kawai(2001), Kawai et al.(2000)). 최근 불포화토의 응력-변형관계, 침투특성과 같은 연구가 진행되어 불포화토의 역학에 체계화가 이루어져 가고 있지만, 그 거동의 복잡성으로 현장에 적용하기까지는 아직 미치지 못하고 있다. 본 논문은 다짐토를 불포화토로 취급하여 기존의 불포화토의 연구 성과를 간략화해서, 다짐관리상 유의함을 목적으로 한다. 특히 다짐토의 압밀항복응력에 중점을 두고 불포화토의 역학거동을 지배하는 흡인력을 적용하는 방법을 검토하였다.

## 2. 실험 방법

다짐곡선과 흡인력 분포의 관계 및 압축특성을 비교하기 위해서 2종류의 실험을 실시하였다. 실험에 이용한 시료는 실트질 점토의 고령토로 그 물리적 특성 및 입도분포 곡선을 표 1 및 그림 1에 각각 나타내었다. 또한 실내다짐시험 결과(다짐 몰드 직경: 100mm, 다짐 햄머 중량: 2.5kg)을 그림 2에 나타내었다.

### 2.1 흡인력을 측정하기 위한 정적다짐시험

실험장치는 그림 3에 나타내었으며, 소정의 함수비로 조절된 시료를 압밀링(직경 50mm)에 투입해서, 정적으로 일차원다짐을 공시체 높이가 20mm가 되도록 하였다. 투입시료의 양은 목적의 함수비와 건조밀도를 미리 계산하여 작성하였으며, 이때 Seed and Chan(1959)의 시험 결과를 기초로 응력이력이 일정하게 되도록 재하대를 이용해서 변형율제어(1.06mm/min:이용한 재하대에 안정한 데이터를 얻기 위한 최소 속도) 다짐을 하였다. 페데스탈(pedestal)부에는 세라믹 디스크(ceramic disk, AEV 500 kPa)을 끼워서 공시체내의 간극수압을 측정할 수 있게 하였다.

### 2.2 다짐토의 압축시험

이상과 같이 정적 다짐시험을 통해 얻어진 다짐 공시체의 압밀 항복응력을 구하기 위하여 직경 60mm의 압밀링에 수침하지 않고 그대로 표준압밀 하였다. 이때에 얻어진 압축곡선으로 Casagrande의 방법을 이용하여 항복응력을 산정하였다. 시험에 이용된 건조밀도, 함수비의 범위와 시험수는 표2에 정리하였다.

## 3. 시험 결과

### 3.1 정적 다짐 시험 결과

정적 다짐시험 중에 얻어진 계측된 간극수압계와 하중계의 측정치의 대표적인 결과를 그림 4에 나타내었다. 횡축에 나타낸 시간은 압밀링에 시료를 투입할 때를 zero로 보고 간극공기압을 재하에서 간극수

표 1. 사용된 시료의 물리적 성질

$G_s$	$w_p$	$w_L$	$I_p$
2.709	20.3%	33.5%	13.2

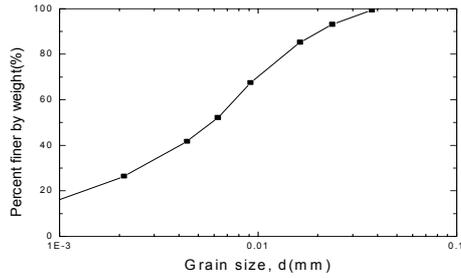


그림 1. 사용된 시료의 입도 분포 곡선

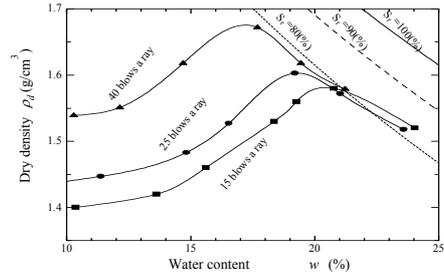


그림 2. 실내다짐(동적)시험 결과

표 2. 공시체 상태 및 시험수

Test	Dry density (g/cm <sup>3</sup> )	Water content (%)	Number of tests
Static Compaction Test	1.40	10-22	7
	1.45	10-19	9
	1.50	10-24	15
	1.55	11-25	13
	1.60	14-20	8
Compression Test	1.65	22	1
	1.30	11-23	6
	1.35	9-23	4
	1.40	7-21	5
	1.45	9-19	7
	1.50	7-20	6
1.55	11-16	3	
1.60	11-20	6	

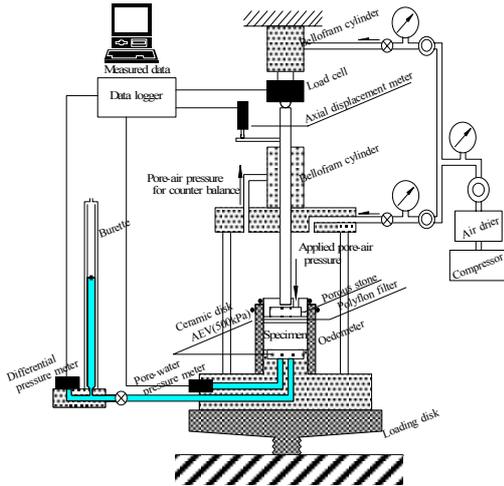
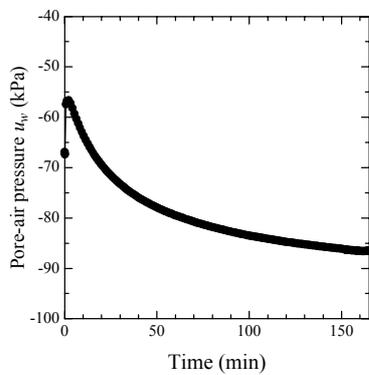
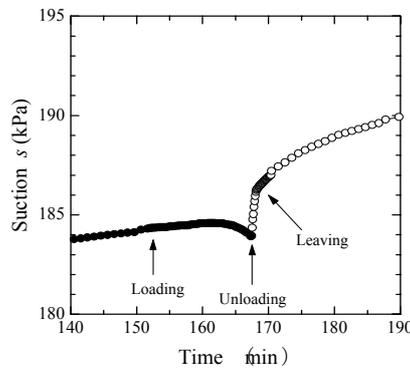


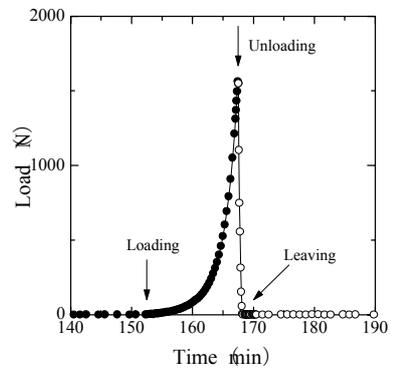
그림 3. 정적다짐 시험 장치



(a) Pore-water pressure change



(b) Suction change



(c) Applied load change

그림 4. 정적다짐시험한 공시체의 다짐중의 거동( $w=9.85\%$ ,  $\rho_d=1.5g/cm^3$ )

압이 일정하게 되는 것을 확인한 후 다짐을 실시하였다.(그림 4(a)) 이때 칼리브레이션(calibration)을 방지하기 위하여 셀압으로 간극공기압 98kPa를 작용시켰다. 그림4(b)는 다짐에 의한 압축과 동시에 간극수압이 커지고(흡인력이 작게 되어) 재하시의 공시체 팽창과 함께 간극수압이 감소(흡인력이 증가)하는 것을 알 수 있다. 그림 4(c)를 보면 공시체에 작용하는 연직하중은 다짐에 의해 급속히 증가하는 것을 알 수 있다. 이때에 최대 하중을 공시체 단면적으로 나누어 다짐응력을 산출하여 압축시험에서 산출한 항복응력과 비교하였다.(그림 10참조)

그림 5는 표 2에 나타난 목표의 건조밀도와 함수비의 조건에서 다짐 시험 중에 공시체에 가한 최대하중의 분포이다. 시험 결과 비교적 함수비가 높은 영역에서는 다짐 중에 배수가 보여진다. 다짐을 불포화토의 비배수 압축거동으로 본다면, 이때의 거동은 배수압축(압밀)로 되어 근본적으로 다른 현상으로 된다. 그러므로 함수비가 높은 지역에선 공시체에 가한 최대하중이 다짐곡선과 등치선의 형상이 같지는 않지만 다짐곡선의 건조 축의 형상은 등치선과 비슷한 양상을 보이고 있다. 이는 동적다짐에 의해 얻은 다짐곡선은 정적 다짐시험으로 얻은 등치선에 포함해서 등가 정적 다짐응력을 산출할 수 있는 것을 알 수 있다.

그림 6은 다짐 후에 정상치인 흡인력 분포를 동적 다짐 곡선 상에 나타낸 것이다. 저함수비 영역에서는 건조밀도의 증가와 함께 흡인력도 증가하지만, 고풍수비영역에서는 건조밀도가 증가 할수록 흡인력은 작게 된다. 함수비가 낮을수록, 건조밀도가 높을수록 높은 흡인력분포를 나타내고 있다. 그림 7은 그림 6에서 나타난 흡인력과 포화도의 관계이다. 같은 포화도에서는 건조밀도가 높을수록 흡인력도 높게 나타나고 있다. 이는 Kawai et al(2000)의 흡-수분특성곡선(soil-water characteristic curve)모델에서, 같은 건조밀도 상태에서 탈수곡선(drying curve), 흡수곡선(wetting curve) 사이를 상한·하한의 흡-수분 특성상태(흡인력-포화도관계)가 결정되기 때문에 건조밀도가 높은 공시체는 높은 범위의 흡인력을 갖게 된다고 설명하였다. 특히 다짐에 의해 얻을 수 있는 공시체는 흡수곡선에 가깝운 흡-수분 특성상태로, 그림 6과 같은 흡인력분포가 얻을 수 있다고 판단된다.

### 3.2 다짐토 압축시험결과

그림 8은 Ohta and Hata(1977), Ohta et al.(1986)의 연구와 같이 다짐토의 압축곡선을 같은 초기함수비로 정리 비교한 것이다. 다소의 차이가 있지만 같은 초기함수비에 하나의 압축곡선이 수렴하고 있다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 다짐토를 불포화토로 취급하면 그 응력성분인 흡인력이 압축곡선에 크

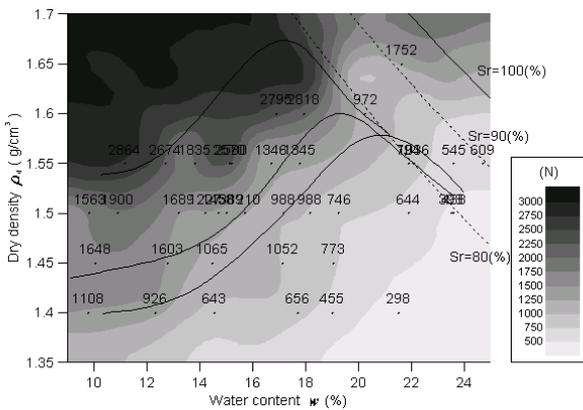


그림 5. 동적다짐시험결과와 최대 하중분포의 비교

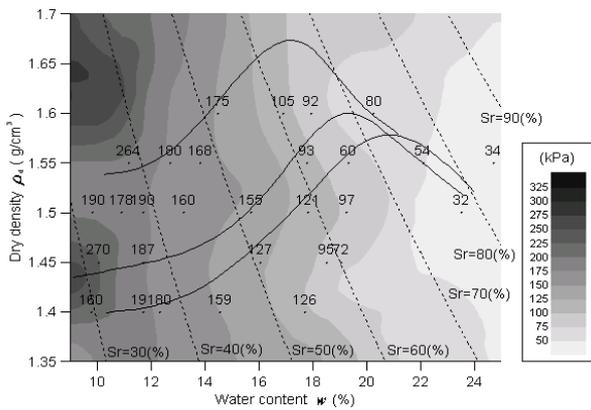


그림 6. 다짐곡선, 흡인력분포 및 포화도관계

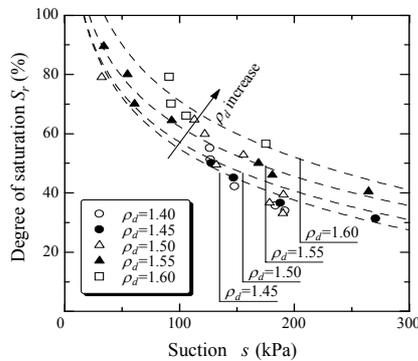


그림 7. 다짐토의 흡인력-포화도관계

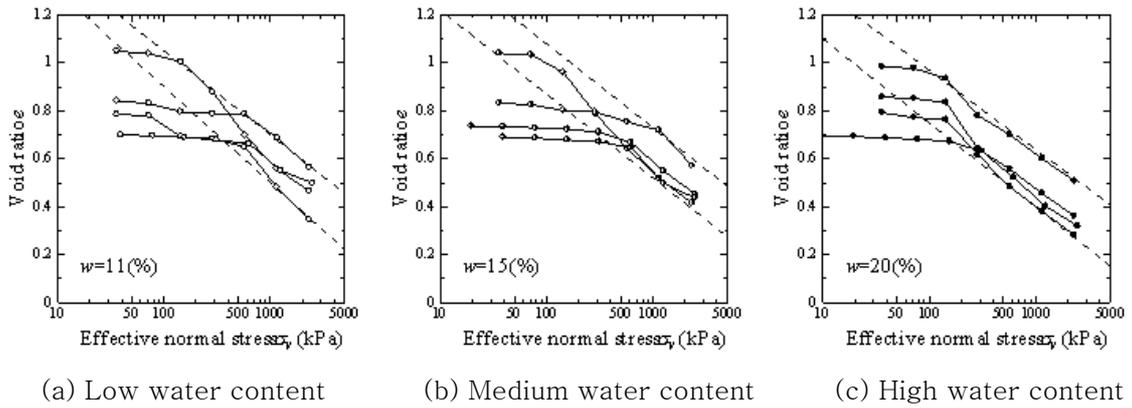


그림 8. 함수비로 정리된 압축곡선

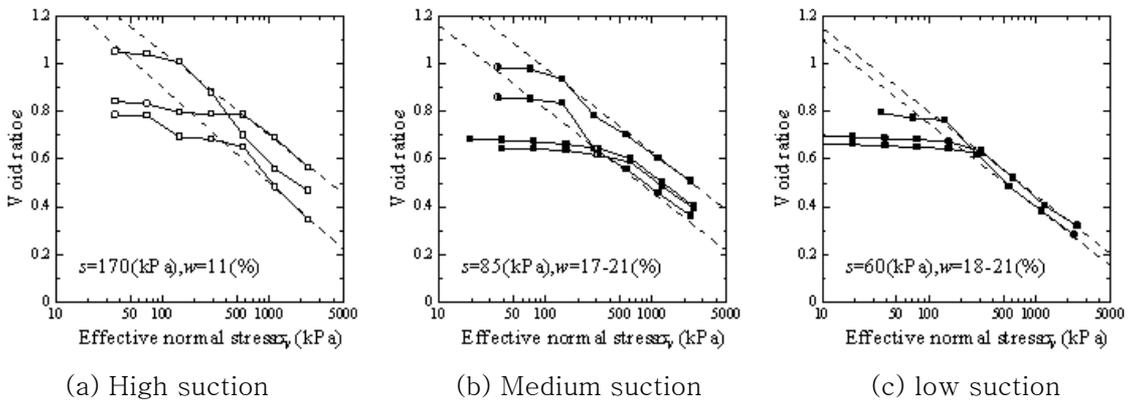


그림 9. 흡인력으로 정리된 압축곡선

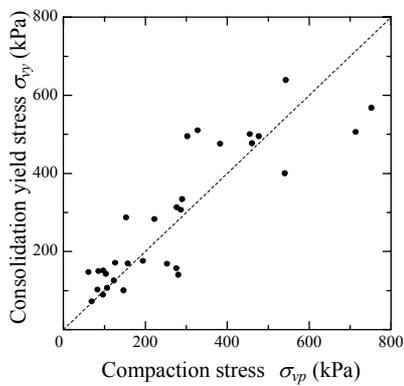


그림 10. 다짐응력-항복응력관계

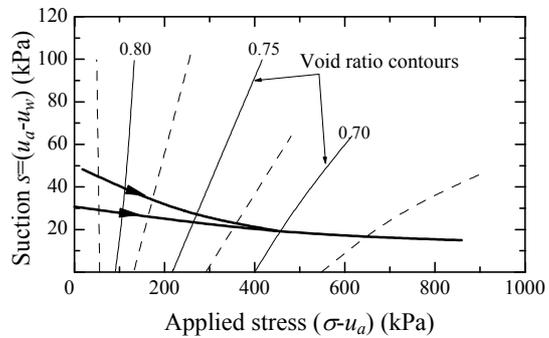


그림 11. Matyas and Radhakrisna (1968)의 연구

게 영향을 주며 함수비는 그 효과를 간접적으로 표현하고 있는 것에 지나지 않는다.(Kawai et al.(2000) Karube et al.(1989)) 그림 6과 그림 7에서, 흡인력이 건조밀도에 의존하고 있다는 것을 고려하면 함수비에 의한 정리는 타당하다고 말할 수 없다.

그림 9는 그림 6을 기준으로 각 공시체의 초기흡인력으로 압축곡선을 정리 비교한 것이다. 그림 9는 흡인력에 의해 정리한 것은 함수비가 다른 공시체의 압축곡선이 하나로 수렴하고 있다는 것을 알 수 있다. 다시 말하면 다짐토에서 정규압밀곡선은 흡인력 따라 달라지는 것을 알 수 있다.

그림 10은 다짐 중에 측정된 최대다짐응력(그림3(c)와 그림4)과 압축시험에 의한 Casagrande의 방법으로 구한 압밀항복응력의 비교이다. 약간의 차이가 보이지만 다짐응력과 압밀항복응력이 서로 일치하고 있다는 것을 알 수 있다.

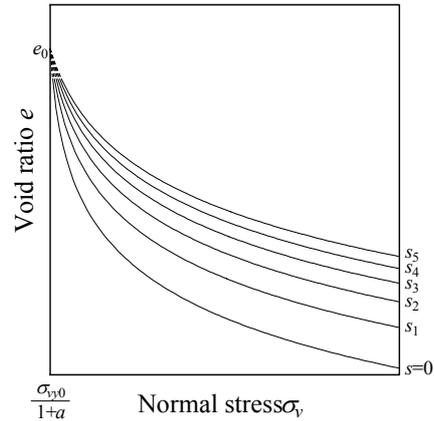
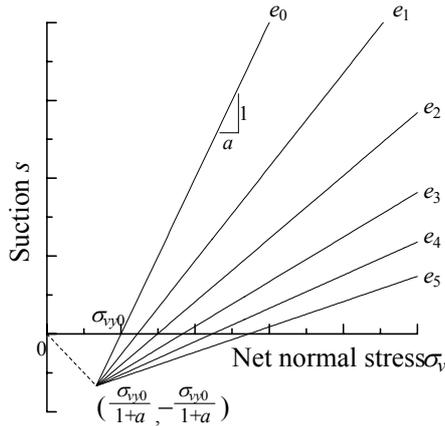


그림 12. Matyas and Radhakrisna(1968) 시험결과의 간략화

그림 13. 식(1)으로 얻을 수 있는 압축곡선군

## 4. 다짐토의 압밀항복응력의 산정

지금까지의 시험결과를 토대로 다짐토에 발생한 흡인력을 이용하여 압밀항복응력을 산정하는 방법을 제안하고자 한다.

### 4.1 압축 곡선

불포화토의 구성모델은 여러 가지로 제안되어 오고 있으며, 각 연구에 따라 압밀항복응력에 관한 접근이 서로 다르다. 그러나 각각의 불포화토 연구는 그림 11에 나타난 Matyas and Radhakrisna(1968)의 시험결과에 기준을 두고 있다. Matyas and Radhakrisna(1968)는 고령토와 형석의 혼합물로 흡인력을 제어한 불포화 삼축· $K_0$  압축시험을 실시하여, 기저응력(net normal stress, 외력과 간극공기압의 차에서 통상 대기압하에서 간극공기가 대기과 연속하고 있다고 생각하면 외력이 그대로 기저응력이로 된다)과 흡인력면상에 등간극비선이 그릴 수 있다는 것을 나타내었다. 이를 기초로 Alonso et al.(1987)은 Matyas and Radhakrisna(1968)의 시험결과와 같이 기저응력과 흡인력을 응력성분으로 하였으나, Kohgo et al.(1993), Karube et al.(1989)는 흡인력의 효과를 2가지로 분류해서 그림 11과 같이 등간극비선이 내부의 수분상태에 의존한다고 하고 있다.

여기에 본 연구는 그림 8, 9의 압축실험 결과를 이용하여, 압축 중에 내부의 수분 상태가 변화하지 않는다고 가정하면, Matyas and Radhakrisna(1968)의 그림 11은 그림 12와 같이 간략화 시킬 수 있으며, 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$e = e_0 - \lambda \ln \frac{\sigma_v + s}{\sigma_{vy0} + (1+a)s} \quad (1)$$

여기서,  $e_0$ ,  $\sigma_{vy0}$  는 항복시의 간극비 및 연직응력,  $\sigma_v$ 는 연직 응력,  $s$ 는 흡인력,  $\lambda$ 는 포화토의 압축지수,  $a$  는 그림 12에 나타난 초기 항복선의 기울기를 나타낸다.

그림 13은 식(1)으로 얻어진 흡인력이 일정하다고 가정된 압축 곡선군이다. 그림중의 압축곡선을 대수좌표상을 이용하면 흡인력 일정의 압축선들은 연직응력이 크게 되어 서로 평행한 직선군으로 된다.

## 4.2 압밀항복응력 산정 방법

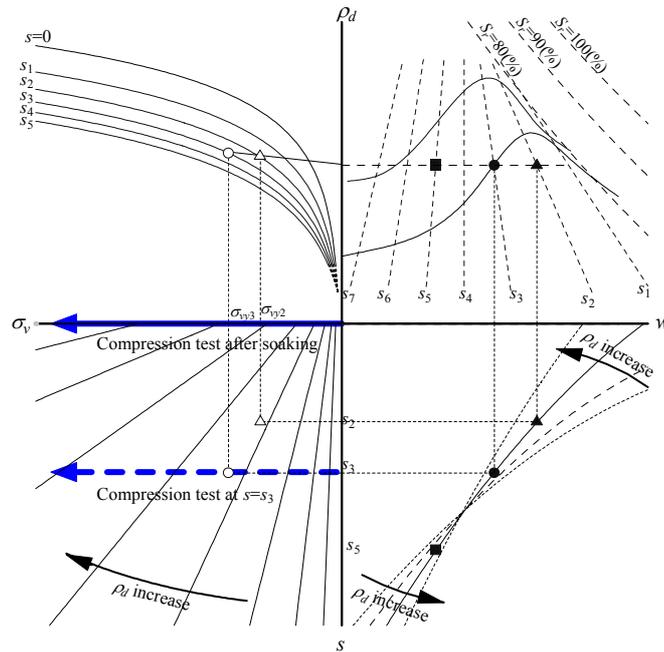


그림 14. 다짐토의 압밀항복응력산정법

전절에서 불포화토의 압축곡선을 간단하게 표현하였지만, 현장에서는 건조밀도와 함수비로 관리하는 경우가 많기 때문에  $\rho_d = \frac{G_s \rho_w}{1 + e}$  을 이용해서 식(1)을 다음과 같이 표현한다.

$$\rho_d = \frac{G_s \rho_{d0} \rho_w}{G_s \rho_w - \rho_{d0} \lambda \ln\left(\frac{\sigma_v + s}{\sigma_{vy0} + (1 + a)s}\right)} \quad (2)$$

여기서,  $\rho_d$ 는 다짐토의 건조 밀도,  $\rho_{d0}$ 는 항복시의 건조 밀도,  $\rho_w$  물의 단위중량,  $G_s$ 는 흙의 비중을 나타낸다.

식(2)을 이용하면, 그림 14의 제2사분면(2nd quadrant)에 보여주는 것 같이 흡인력에 의존하는 정규 압밀곡선군이 그려진다. 다짐토가 가진 흡인력이 그림 14의 제1사분면(1st quadrant)과 같이 얻어지면(그림 6), 이 공시체의 항복후의 압축곡선은 제2사분면에 나타난 것 같이 그때그때의 흡인력의 압축곡선에 일치한다. 이 경우 압축지수를 일정하다고 가정하면 탄성 영역 내에서의 압축선과 정규압밀선과의 교점이 압밀항복응력으로 산정 될 수 있다. 예를 들어, 같은 건조밀도에서 다른 함수비를 가진 ●▲로 표현되는 상태에 다짐된 공시체는 다른 흡인력을 가지고 제2사분면으로 나타내어 ○△로 항복하여, 그때 그때의  $\sigma_{vy2}$ ,  $\sigma_{vy3}$ 의 압밀항복응력을 산정할 수 있다.

이하는 그림 14의 작성법을 나타낸 것이다.

① 그림 7에 의해 각각의 건조밀도의 함수비-흡인력 관계를 구하여 제4사분면(4th quadrant, 수분특성곡선)을 작성하면, 제1사분면의 다짐 곡선 상에 흡인력 분포를 그릴 수 있다.

② 제2사분면의 압축곡선은 제3사분면(3rd quadrant)에 Maytas and Radhakrisna(1968)의 시험결과에 기초한 건조밀도선을 그리면 구할 수 있다. 이 건조밀도선군을 그리기 위해 임의의 상태에 다짐된 공시체를 2가지 준비하여 하나는 그대로 압밀시험, 다른 하나는 수침후(흡인력, s=0) 압밀을 한다. 이때

제 3사분면상에서는 그림 14중에 나타난 2개의 응력경로를 그릴 수 있다. 이 경로상에서 등건조밀도선을 그리면 된다.

## 5. 결론

본 연구의 내용을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 삼축 시험기를 이용 정적 다짐 시험을 실시하여, 다짐토의 역학적 거동을 불포화토의 역학 특성을 이용하여 규명을 시도하였다. 그 결과 정적 다짐응력은 다짐 곡선의 건조축에서 동적 다짐을 설명가능함을 알 수 있었다. 또 정적 다짐 중에 흡인력을 측정하여 다짐곡선 상에 나타내었으며, 저함수비 영역에서는 건조밀도의 증가와 함께 흡인력도 증가하지만, 고함수비영역에서는 건조밀도가 증가 할수록 흡인력은 작게 되는 것을 알 수 있었다.
- (2) 소정의 다짐 상태(건조 밀도, 함수비)에 있는 공시체를 이용하여, 1차원 압축 시험을 실시하고, 그 압축 특성 및 항복 특성을 비교하였다. 그 결과 얻어진 압축 곡선은, 같은 흡인력에서 정규압밀곡선의 수렴이 보여지고, 그 합리성을 확인할 수 있었다. 또 다짐토의 항복 응력은 다짐 시의 최대 다짐 응력과 일치하는 것을 알 수 있었다.
- (3) 이상의 시험결과를 기초로 하여, 다짐토의 항복 응력을 산정하는 방법을 제안하였다. 이는 임의의 다짐 상태(건조 밀도, 함수비)에 있는 시료의 항복 응력을 산정이 가능하며, 현장 시공에 유익한 수법으로서 활용 할 수 있을 것으로 생각된다.

## 참고문헌

1. Alonso, E. E., Gens, A. and Hight, D. W.(1987), Special problem soils, General Report, *Proc. 9th European RC-SMFE*, pp. 1087-1146.
2. Karube, D. and Kato, S.(1989), Yield functions of unsaturated soil, *Proc. of 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, Vol.1, pp.615-618
3. Karube, D., Katsuyama, J., Nishiumi, K., Niwa, N.(1989), Yield function of unsaturated soils under triaxial compression, *Journal of Geotechnical Engineering*, JSCE, No.406/III-11, pp.205-211
4. Karube, D. and Kawai, K.(2001), The role of pore water in the mechanical behavior of unsaturated soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.19, No.3, pp. 211-241.
5. Kawai, K. Karube, D. and Kato, S.(2000), The model of water retention curves considering effects of void ratio, *Proc. Asian Conf. on Unsaturated Soils*, pp. 329-334.
6. Kohgo, Y., Nakano, M. and Miyazaki, T.(1993) Theoretical aspects of constitutive modeling for unsaturated soils, *Soil and foundations*, Vol.33, No.4, pp.49-63.
7. Matyas, E. L. and Radhakrisna, H. S.(1968), Volume change characteristics of partially saturated soils, *Geotechnique*, Vol. 18, No. 4, pp. 432-448.
8. Ohta, H. and Hata, S. (1977), Strength of dynamically compacted soils, *Proc. 9th ICSMFE*, Vol.1, pp. 239-242.
9. Ohta, H., Nisida, Y., Kuniyasu, I., and Kaneko, Y.(1986), Soil compaction-Quality control and verification, *Soils and Foundations*, Vol. 34, No.5, pp. 43-48.(in Japanese)
10. Proctor, R. R.(1933), Four articles on the design and construction of rolled-earth dams, *Eng. News Record*, Vol.111, pp. 245-248, 286-289, 348-351, 372-376.
11. Seed, H. B. and Chan, C. K.(1959), Structure and strength characteristics of compacted clays, *Journal of SMFD, Proc. ASCE*, SM5, pp. 87-125.