

정적 다짐시의 흡인력 변화와 그 특성을 이용한 다짐토의 압밀항복응력 산정방법

Suction Changes During Static Compaction and an Estimate of the Consolidation Yield Stress in Compacted Soil

김 은 라¹ Kim, Eun-Ra

Abstract

This paper presented a method to estimate the consolidation yield stress of compacted soil with an unsaturated soil mechanics, especially considering the effect of matric suction. Then two kinds of experiments were conducted. One is a series of static compaction tests to monitor the matric suction, and the other is a series of consolidation tests on compacted soil without soaking. The results indicate that it is possible to derive the distribution of matric suction on compaction curves and to hypothesize the changes of the void ratio depending on the matric suction in the consolidation tests. With this experimental results, a new method was introduced to estimate the consolidation yield stress of compacted soil including compaction curves.

요 지

본 연구는 불포화토의 역학적 특성, 특히 매트릭 흡인력(matric suction)을 이용하여 다짐토의 압밀 항복응력을 산정하는 방법에 대해 검토되었다. 이를 위해, 두 종류의 시험을 실시하였다. 하나는 흡인력을 측정하기 위하여 정적 다짐 시험이 실시하였으며, 다른 하나는 수침시키지 않은 다짐토의 압밀시험을 실시하였다. 그 시험 결과, 다짐곡선 상에 흡인력의 분포를 나타낼 수 있었으며, 압밀시험에서 간극비의 변화는 흡인력에 의존하는 것을 알 수 있었다. 이상의 시험결과를 기초로 하여, 다짐 곡선을 포함하는 다짐토의 압밀 항복 응력을 산정하는 새로운 방법을 제안하였다.

Keywords : Compacted soil, Consolidation yield stress, Matric suction

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 구하였다. 그리고 그 값을 이용하여 흙의 특성곡선을 작성, 현장 다짐토의 공학적 성질을 추정하도록 하였다.

또, Proctor는 실내 다짐시험을 가상 해석을 통해, 지금까지 경험적으로 실시해 오던 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 있다. 이러한, 현재의 [다짐도(성토의 건조밀도/실내다짐시험에 의한 최대건조밀도)] 관리와 같은 흙의 다짐도만으로 구조물의 안전도

¹ 정회원, 전북대학교 토목공학과 공업기술연구소 연구원 · 공학박사 (Member, Dept. of Civil Engr., Research Center of Industrial Technology, Chonbuk National Univ., kimeunra@chonbuk.ac.kr)

를 평가하는 것은 흙의 공학적 성질에의 접근이 어렵게 된다. 이에 Seed and Chan(1959)은 다짐 방법이 다른 3 종류의 시료를 제작하여, 전단 특성을 비교한 결과 다짐 방법에 따라 강도특성이 다르다는 것을 설명하였다. 이후, 다짐 상태보다 압밀 항복응력을 산정하는 방법으로 Ohta and Hata(1977)는 실트질 점토에 등체적일면전단 시험을 실시하여, 그 압밀항복응력과 강도 특성을 상세하게 조사하여 체계화 시켰다. 그 결과 함수비마다 다른 압축특성으로 정리 되어 등체적 전단 강도는 함수비·간극비에 관계없이 선행압밀압력에 의해 결정되는 것을 알 수 있었다. 또한, Ohta et al.(1986)은 건조밀도로 압축곡선을 표시하여, 다짐관리방법을 제안 하였다. 이들은 기본적으로 다짐토의 압밀항복응력이 최대 강도를 나타낸다는 바탕하에 다짐관리는 다짐토의 압밀항복응력으로 관리해야 한다고 설명하고 있다. 본 논문 또한 기본적인 맥락은 Ohta et al.(1986)과 같은 생각에서 출발 하였다.

여기에, 다짐토는 간극에 물과 공기를 포함한 불포화토로 강우나 지하수의 변동에 의한 외수위의 영향을 크게 받으며 변형률의 축적과 같이 본래의 품질을 유지하고 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 다짐관리의 기본적인 바탕은 Ohta et al.(1986)의 연구를 바탕으로 하고 여기에 다짐토를 불포화토로 취급하여, 불포화토의 역학거동을 지배하는 흡인력을 중심으로 다짐토의 압밀항복응력을 구하는 방법을 새롭게 제안하고자 한다.

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)를 그림 2에 나타내었다.

표 1. 사용된 시료의 물리적 특성

G_s	w_p	w_L	I_p
2.709	20.3%	33.5%	13.2

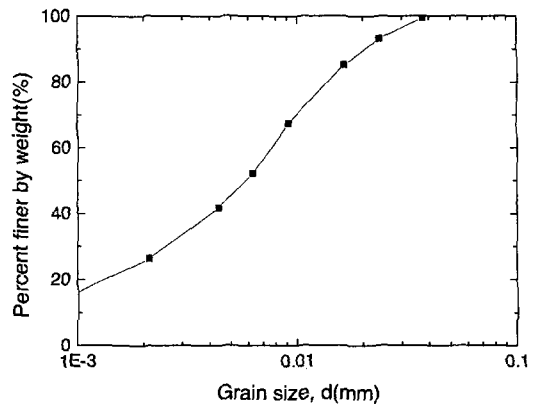


그림 1. 사용된 시료의 입도 분포 곡선

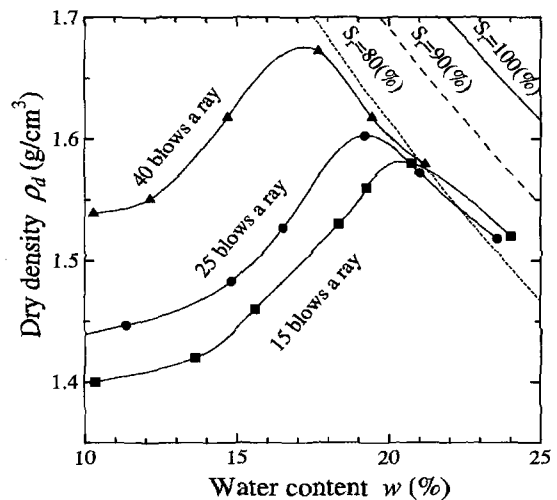


그림 2. 실내다짐(정적)시험 결과

2.1 흡인력을 측정하기 위한 정적다짐시험

본 실험은 삼축 시험기를 이용하여 정적 다짐 시험을 실시하였다. 실험 방법으로는 소정의 함수비로 조절된 시료를 압밀링(직경 50mm)에 투입해서, 정적으로 일차원 다짐을 시료 높이가 20mm가 되도록 하였다. 시료 투입량은 목적의 함수비와 건조밀도를 미리 계산하여 작성하였다. 이때 Seed and Chan(1959)의 시험 결과를 기초로 응력이력이 일정하게 되도록 재하대를 이용하여 변형을 제어(1.06mm/min : 이용한 재하대에 안정한 데이터를 얻기 위한 최소 속도) 다짐을 하였다. 페데스탈(pedestal)부에는 세라믹 디스크(ceramic disk, AEV 500 kPa)를 끼워서 시료내의 간극수압을 측정할 수 있게 하

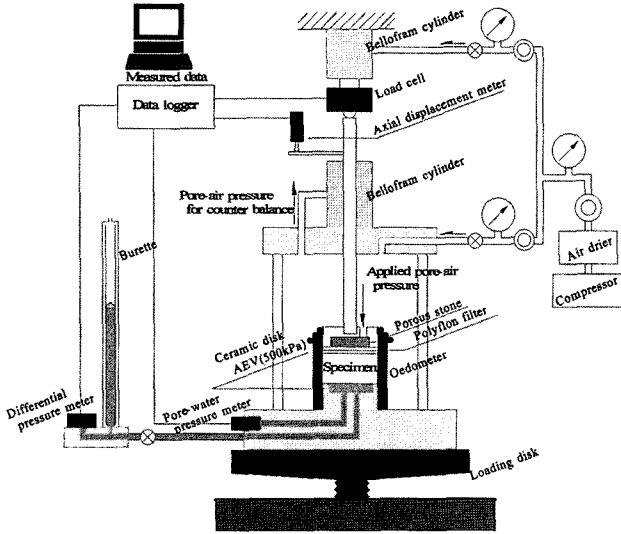


그림 3. 정적다짐 시험 장치

였다. 여기서, 세라믹 디스크는 물로 포화시키면 세라믹의 구멍에서 물의 표면장력에 의하여, 공기의 침입을 막을 수 있는 성질이 있다. 실험에서는 세라믹 디스크 및 간극수압계의 경로는 미리 포화시켜야 되며, 그 방법으로는 먼저, 세라믹 디스크 및 간극수압계의 경로를 진공 펌프로 24 시간 탈기하고, 그 속에 탈기수(미리 공기를 뺀 증류수)를 넣어 진공 펌프로 탈기하여 포화시킨다. 이들이 포화하지 않고 간극수압계의 경로에 공기가 잔류하고 있으면, 압력이 가해질 때 공기가 수축을 일으켜, 간극수압을 정확하게 계측할 수 없게 되기 때문이다.

그림 3은 정적 다짐시험을 실시한 실험 장치를 나타내고 있다.

2.2 다짐토의 압축시험

이상과 같이 정적 다짐시험을 통해 얻어진 다짐 시료를 직경 60mm의 압밀링에 수침하지 않고 그대로 표준압밀 하였다. 이때에 얻어진 압축(압밀)곡선은 Casagrande의 방법을 이용하여 항복응력을 산정하였다.

시험에 이용된 시료제원은 표 2에 정리하였다.

3. 시험 결과

3.1 정적 다짐 시험 결과

정적 다짐시험 중에 얻어진 계측된 간극수압계와 하중계 측정치의 대표적인 결과를 그림 4에 나타내었다. 횡축에 나타난 시간은 압밀링에 시료를 투입할 때를

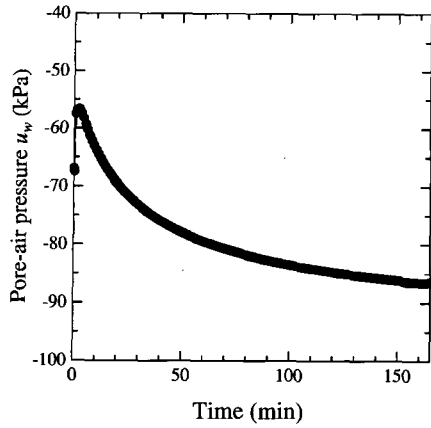
표 2. 시료 제원

Test	Dry density (g/cm ³)	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	

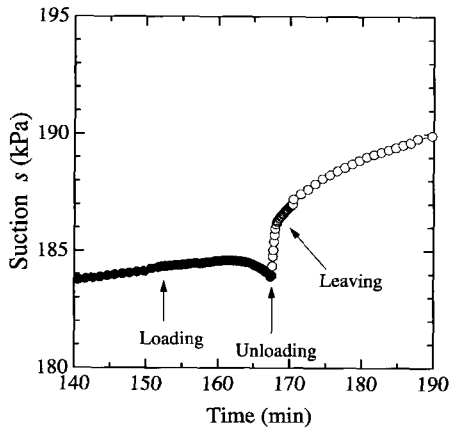
zero로 보고 간극공기압을 재하 하여 간극수압이 일정하게 되는 것을 확인한 후 다짐을 실시하였다(그림 4(a)). 이때 케비테이션(cavitation)을 방지하기 위하여 셀압으로 간극공기압 98kPa를 작용시켰다. 그림 4(b)는 다짐에 의한 압축과 동시에 간극수압이 커지고(흡인력이 작게 되어) 재하시의 시료 팽창과 함께 간극수압이 감소(흡인력이 증가)하는 것을 알 수 있다. 그림 4(c)를 보면 시료에 작용하는 연직하중으로 다짐에 의해 급속히 증가하는 것을 알 수 있다. 이때에 최대 하중을 시료 단면적으로 나누어 다짐응력을 산출하였으며, 압축시험에서 산출한 항복응력과 비교하였다(그림 10 참조).

그림 5는 표 2에 정리한 목표의 건조밀도와 함수비의 조건에서 다짐 시험 중에 시료에 가한 최대하중 분포이다. 시험 결과 비교적 함수비가 높은 영역에서는 다짐 중에 배수가 보여 진다. 다짐을 불포화토의 비배수 압축 거동으로 보면, 이때의 거동은 배수압축(압밀)로 되어 근본적으로 다른 현상으로 된다. 그러므로 함수비가 높은 지역에선 시료에 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 있다는 것을 알 수 있다.

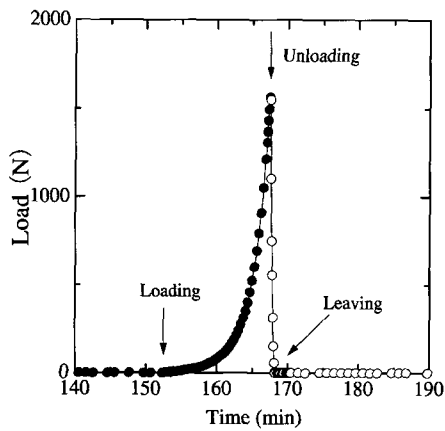
그림 6은 다짐 후에 정상치인 흡인력 분포를 동적 다짐 곡선 상에 나타낸 것이다. 저함수비 영역에서는 건조밀도의 증가와 함께 흡인력도 증가하지만, 고탄수비영역에서는 건조밀도가 증가 할수록 흡인력은 작게 된다. 함수비가 작을수록, 건조밀도가 클수록 높은 흡인력분



(a) 간극수압 변화



(b) 흡인력의 변화



(c) 다짐 하중의 변화

그림 4. 정적 다짐 시험 중 시료의 거동($w=9.85\%$) $\rho_d=1.5\text{g}/\text{cm}^3$

포를 나타내고 있다.

그림 7은 그림 6에 나타난 흡인력과 포화도의 관계이다. 같은 포화도에서는 건조밀도가 클수록 흡인력도 높게 나타나고 있다. 이는 Kawai et al.(2000)은 흡수분 특성곡선(soil-water characteristic curve)모델에서, 같은 건조밀도 상태에서 탈수곡선(drying curve), 흡수곡선(wetting curve) 사이를 상한·하한의 흡수분 특성 상태

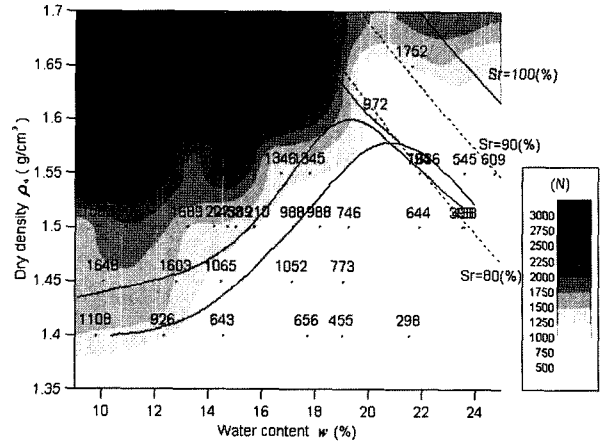


그림 5. 동적 다짐 곡선과 정적 다짐 시험의 최대 하중 분포 비교

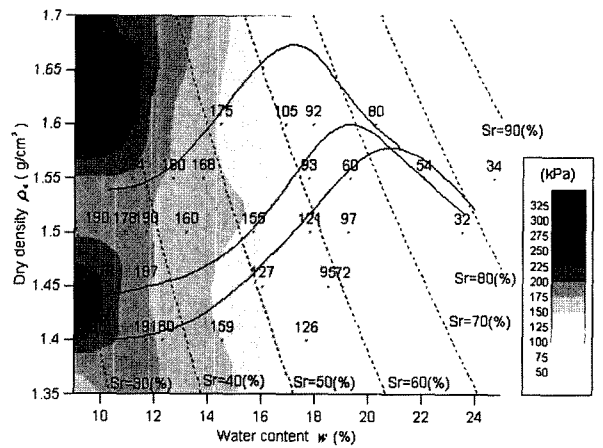


그림 6. 동적 다짐 곡선 상에 정리한 흡인력 분포

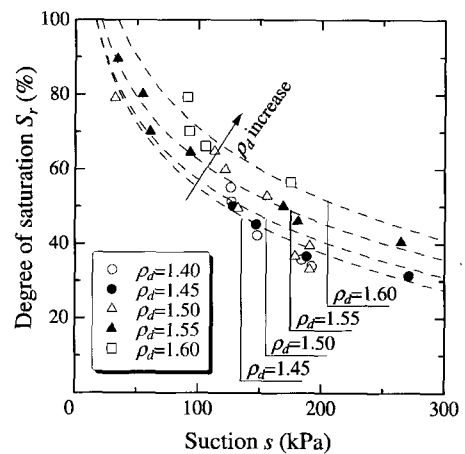


그림 7. 다짐토의 흡인력-포화도관계

(흡인력-포화도관계)가 결정되기 때문에 건조밀도가 높은 시료는 높은 범위의 흡인력을 갖게 된다고 설명하였다. 특히 다짐에 의해 얻어진 시료는 흡수곡선에 가까운 흡수분 특성상태로, 그림 6과 같은 흡인력 분포가 얻어질 수 있다고 판단된다.

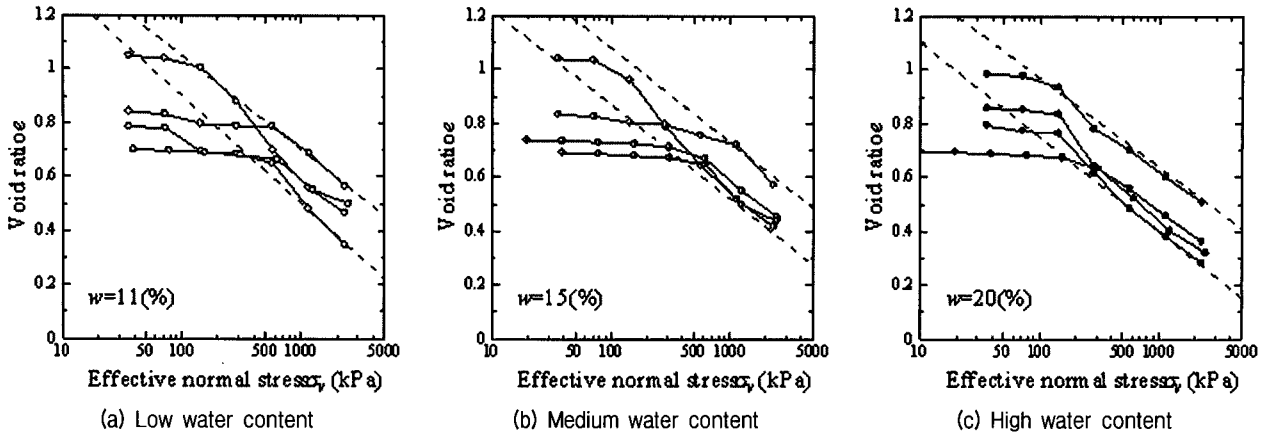


그림 8. 함수비로 정리된 압축곡선

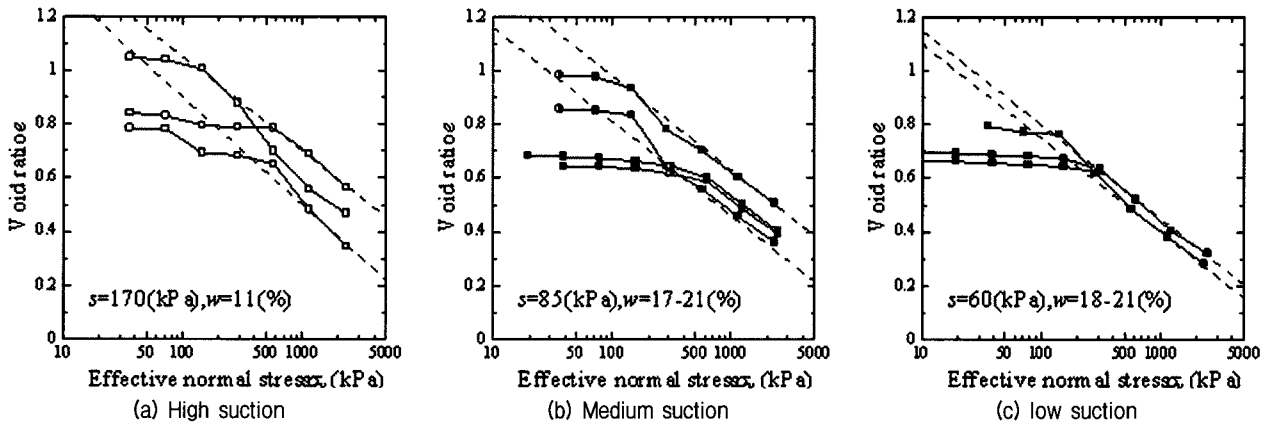


그림 9. 흡인력으로 정리된 압축곡선

3.2 다짐토의 압축 시험 결과

그림 8은 Ohta and Hata(1977), Ohta et al.(1986)의 연구를 바탕으로 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 크게 영향을 주며 함수비는 그 효과를 간접적으로 표현하고 있는 것에 지나지 않다(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 시료의 초기 흡인력으로 압축곡선을 정리 비교한 것이다. 그림 9는 함수비가 서로 다른 시료의 압축곡선이 하나로 수렴하고 있다는 것을 알 수 있다. 다시 말하면 다짐토에서 정규압밀곡선은 흡인력에 의해 좌우되는 것으로 판단할 수 있다.

그림 10은 다짐 중에 측정된 최대다짐응력(그림 3(c)와 그림 4)과 압축시험에서 Casagrande의 방법으로 구한 압밀항복응력의 비교이다. 약간의 차이가 보이지만 다짐응력과 압밀항복응력이 서로 일치하고 있다는 것을 알 수 있다.

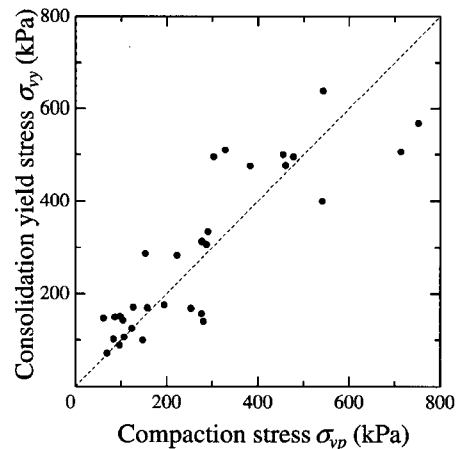


그림 10. 정적다짐응력과 압축 실험에서 구한 압밀 항복 응력 관계

4. 다짐토의 압밀항복응력의 산정

지금까지의 시험결과를 바탕으로 하여 다짐토에 발생하는 흡인력을 이용하여 압밀항복응력을 산정하는 방법을 새롭게 제안하고자 한다.

4.1 흡인력을 중심으로 하는 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·K₀ 압축시험을 실시하여, 기저응력(net normal stress; 외력과 간극공기압의 차에서 통상 대기압 하에서 간극공기가 대기와 연속하고 있다고 생각하면 외력이 그대로 기저응력으로 된다)과 흡인력면상에 등간극비선이 그려지는 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 수분 상태에 의존하고 있다고 설명하고 있다.

여기에 본 연구는 그림 8, 9의 압축실험 결과를 바탕으로, 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.

$$e = e_0 - \lambda \ln \frac{\sigma_v + s}{\sigma_{v0} + (1+a)s} \quad (1)$$

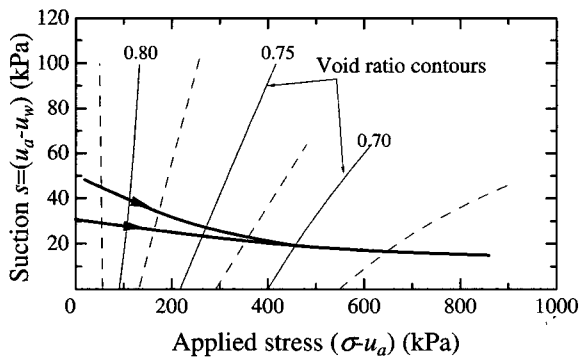


그림 11. Matyas and Radhakrisna(1968)의 연구

여기서, e_0 , σ_{v0} 는 항복시의 간극비 및 연직응력, σ_v 는 연직 응력, s 는 흡인력, λ 는 포화토의 압축지수, a 는 그림 12에 나타난 초기 항복선의 기울기를 나타낸다.

그림 13은 식 (1)에서 얻어진 흡인력이 일정하다고 가정된 압축 곡선군이다. 그림중의 압축곡선을 대수좌표상을 이용하면, 압축곡선들은 서로 평행한 직선군으로 된다.

4.2 새로운 압밀항복응력 산정 방법

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

$$\rho_d = \frac{G_s \rho_{d0} \rho_w}{G_s \rho_w - \rho_{d0} \lambda \ln \left(\frac{\sigma_v + s}{\sigma_{v0} + (1+a)s} \right)} \quad (2)$$

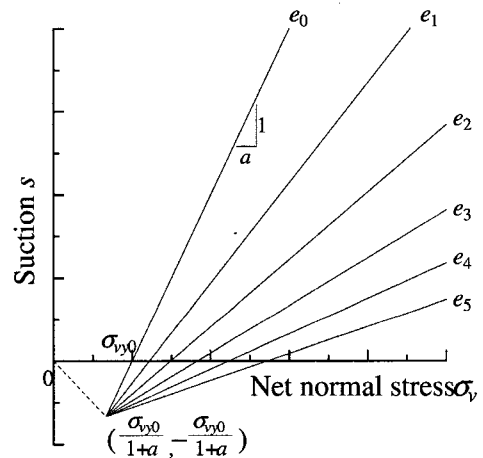


그림 12. Matyas and Radhakrisna(1968) 시험결과의 간략화

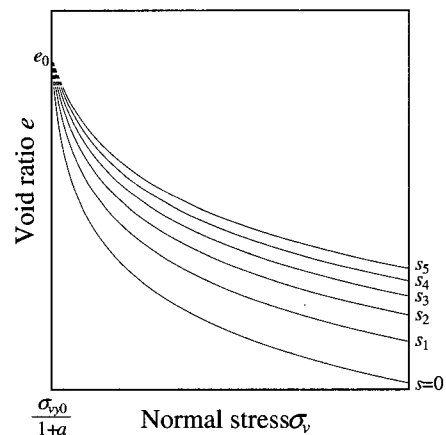


그림 13. 식 (1)로 얻을 수 있는 압축곡선군

여기서, ρ_d 는 다짐토의 건조 밀도, ρ_{d0} 는 항복시의 건조 밀도, ρ_w 물의 단위중량, G_s 는 흙의 비중을 나타낸다.

식 (2)를 이용하면, 그림 14의 제2사분면(2nd quadrant)에 흡인력에 의존하는 정규 압밀 곡선 군이 그려진다. 다짐토가 가지고 있는 흡인력은 그림 14의 제1사분면(1st quadrant)에서 얻어지면(그림 6), 이 시료의 항복 후의 압축곡선(제2사분면)은 각각의 흡인력의 압축곡선에 일치한다. 이 경우 압축지수를 일정하다고 가정하면 탄성 영역 내에서 압축 곡선과 정규압밀곡선과의 교점이 압밀항복응력으로 산정 될 수 있다. 예를 들어, 같은 건조밀도에서 다른 함수비를 가진 ●, ▲로 표현되는 다짐된 시료는 각각 s_3, s_2 로 흡인력을 구할 수 있다. 그리고, 제2사분면에서 s_3, s_2 의 압축곡선에 ○, △로 항복하여, 각각의 $\sigma_{vy2}, \sigma_{vy3}$ 의 압밀항복응력을 산정할 수 있다.

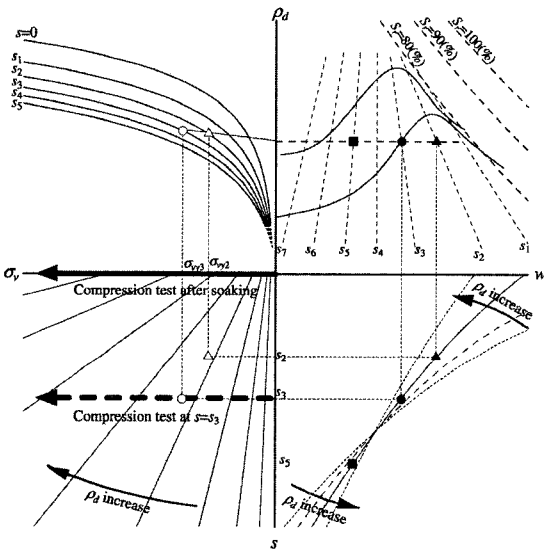


그림 14. 다짐토의 압밀항복응력 산정방법

이하는 그림 14의 작성법을 정리하였다.

- 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 건조 밀도선과 식 (2)으로 구할 수 있다. 이 건조 밀도선군을 그리기 위해 임의의 상태에 다짐된 시료를 2가지 준비하여 하나는 그대로 압밀시험, 다른 하나는 수침 후(흡인력, $s=0$) 압밀을 한다. 이때 제 3사분면상에서는 그림 14중에 나타난 2개의 응력경로를 그릴 수 있다. 이 경로 상에서 등 건조밀도선을 그리면 된다(그림 15).

4.3 다짐토의 강도

불포화토의 파괴기준은 배수조건에 관계없이, Karube et al.(1989)은 다음의 식으로 설명하였다.

$$q = M(p + p_s) \quad (3)$$

이 때의 p-q평면에서 항복면은 다음식으로 표현하며, 그림 16과 같이 표현된다.

$$q = -M(p + p_s) \ln \left(\frac{p + p_s}{p_y + p_s} \right) \quad (4)$$

여기서, q 는 주응력차, M 은 포화토의 한계상태의 경사, p 는 평균기저응력, p_y 는 $q=0$ 일 때의 압밀 항복응력이

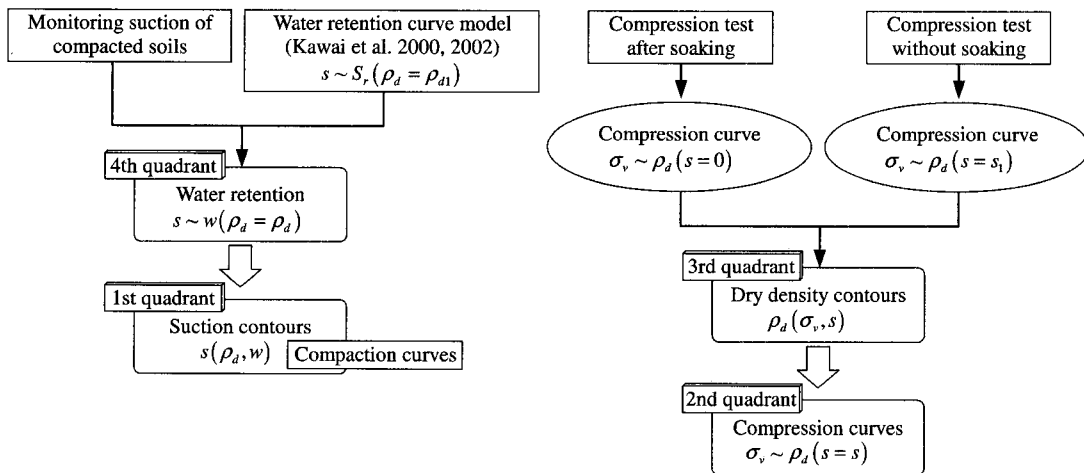


그림 15. 다짐토의 압밀항복응력 산정방법(그림 14)의 차트를 만드는 방법

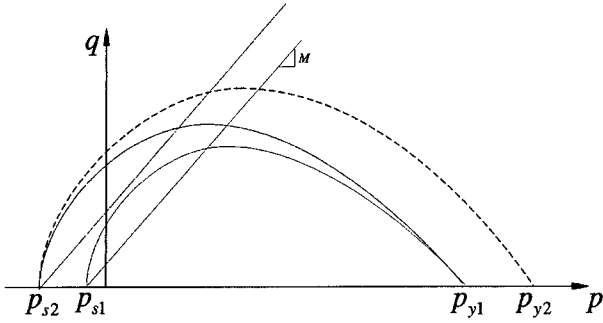


그림 16. p-q 평면에서 항복면

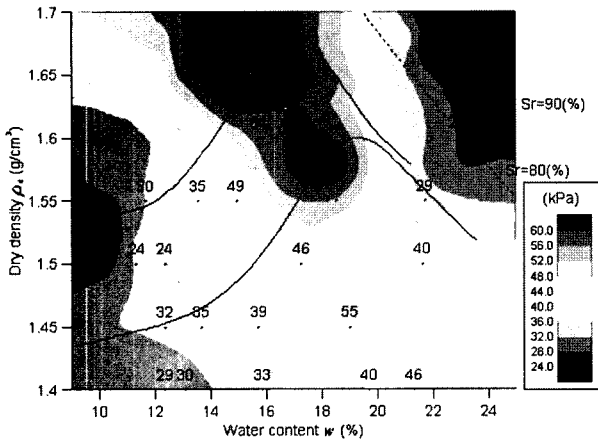


그림 17. 동적 다짐 곡선 상의 흡인 응력 분포

다. p_s 는 흡인 응력(matric suction stress)으로, 다음 식으로 전단저항력 증분에 기여하는 흡인력의 효과를 표현한다.

$$p_s = \frac{S_r - S_{r0}}{100 - S_{r0}} s \quad (5)$$

여기서 S_r 는 포화도, S_{r0} 는 흡착수가 점유하는 포화도이다. 이 흡인 응력은 다짐상태와 흡인력을 알게 되면 산출가능하다. p_y 는 다음식으로 그림 14에서 얻어진 압밀 항복응력 σ_{vy} 을 대입하면 구할 수 있다.

$$p_y = \frac{(1 + 2K_0)}{3} \sigma_{vy} \quad (6)$$

여기서, K_0 는 정지토압계수이다.

그림 17은 그림 6에서 산출한 흡인 응력 분포이다. 다짐토의 강도는 일반적으로 최적함수비 보다 조금 건조측에서 피크에 도달한다고 할 수 있으나, 흡인응력도 극대치로 되는 것을 알 수 있다. 이는 다짐 곡선에서 최적함수비 이하의 함수비(건조측)에서 흙의 강도가 크게 변화한 것에 대하여, 그 이상의 함수비(습윤측)에서는

변화하지 않는 것은, 흡인 응력의 영향에 의한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구의 내용을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 삼축 시험기를 이용 정적 다짐 시험을 실시하였으며, 그 결과 정적 다짐응력은 동적 다짐 곡선의 건조측에서 동적 다짐과 일치함을 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)의 시료를 이용하여, 1차원 압축 시험을 실시하고, 그 압축 특성 및 항복 특성을 비교하였다. 그 결과 얻어진 압축 곡선은 같은 흡인력에서 정규압밀곡선의 수렴이 보여졌다. 이는 다짐토에서 정규압밀곡선은 흡인력에 의해 좌우되는 것으로 판단되었다. 또 다짐토의 항복 응력은 다짐 시의 최대 다짐 응력과 일치하는 것을 알 수 있었다.
- (3) 이상의 시험결과를 기초로 하여, 흡인력을 이용한 다짐토의 압밀 항복 응력을 산정하는 방법을 새롭게 제안하였다.

감사의 글

이 연구에 도움을 주신 일본 Kobe대학의 Iizuka 교수님과 Kawai 조수에게 감사를 드리며, 이 논문은 2004년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었습니다(R03-2004-000-10019-0).

참고 문헌

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., 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 and Niwa, N. (1989), Yield function of unsaturated soils under triaxial compression,

- Journal of Geotechnical Engineering*, JSCE, No.406/III-11, pp. 205-211. (in Japanese)
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.

(접수일자 2005. 5. 31, 심사완료일 2005. 7. 5)