

先行荷重에 의한 粘土의 強度特性 Strength Characteristics of Clay Soil by Preconsolidation Pressure

전 용 백*, 신 영 기**

Yong-Baek Chon, Young-Gi Shin

<Abstract>

This study consolidation undrain Triaxial Compression Tests using constant confining pressure in clay that receive preconsolidation stress that is different and, void ratio, pore water pressure coefficient, shear strength compare with another thing theory and studied analyzing change relation of elastic modules. The summary of analysis is follows: If preconsolidation stress increases in same confining stress in relation of preconsolidation stress and deviator stress, deviator stress is proportional and increased. Can know that excess void pressure is proportional and decreases in size of preconsolidation stress in same confining stress state if preconsolidation stress increases preconsolidation stress and relation of excess void pressure. Also, over consolidated state can assume that this is thing by Dilatancy's effect though excess void pressure decreased remarkably. Preconsolidation stress and relation of stress path can know that shear strength degree increases preconsolidation stress increases, and specially, preconsolidation stress was appear in stress path form of overconsolidated state case of clay that receive at 300, 400, 500kPa in 100, 150kPa's deviator stress.

Key words : shear strength, preconsolidation stress, confining stress

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

우리나라의 연약지반은 성인(成因)과 지역에 따라 내륙의 충적점토지반과 해안부근의 해성 점토 지반으로 구분할 수 있다.

이와는 별도로 최근 들어 하천이나 해안 등의 공유수면 매립 공사가 늘고 있는데, 이들 매립 지반의 대부분도 연약지반으로 볼 수 있다.

이러한 연약지반은 대부분 과압밀비가 1~2 정도로 정규압밀 또는 약간 과압밀된 점토에 해당된다.

* 대구대학교 공과대학 건설환경공학부 공학박사
E-mail : yongbaek@daegu.ac.kr

** 대구대학교 대학원 토목공학과 박사과정
E-mail : skvnaled@hanmail.net

연약지반의 경우, 매우 큰 자연함수비와 간극비를 가지므로 외부하중변화에 의해 매우 큰 압축성과 매우 작은 전단저항 특성을 나타낸다. 따라서 적절한 기초지반으로 이용되기 위해서는 그 거동특성을 변화시켜 강도를 증대시킬 필요가 있다. 실제로 연약지반의 경우는 입자간 전기적 인장력의 작용에 의해 외부에서 작용하는 구속응력이 전혀 없는 경우에도 배수상태의 전단저항을 가지는 진점착력을 가질 수 있다. 이러한 효과는 주로 과압밀 점토지반의 경우에 나타나며 이는 과거에 작용되었던 외부하중에 의해 입자의 배열구조가 더 밀착되어 간극비가 감소되었기 때문이다.

1776년 Coulomb이 흙의 전단강도 이론을 발표한 이래 1957년 Newland와 Allely는 응력-다이러턴시 이론을 제안하였다. 1962년 Rowe는 응력-다이러턴시 이론을 체계적으로 정립발전하였으며 많은 실험을 통한 실험적 결과를 제시하여 이론의 신뢰성을 높였다. 1963년 Rowe와 Roscoe등은 점토에 대해서도 응력-다이러턴시 관계로 내부거동을 관찰할 수 있음을 실험적으로 규명하였다.

또한 연약점토지반의 비배수 전단강도정수는 Skempton이 유효상재하중에 비례하여 주어진 지반의 소성지수와 관련이 있다고 제안하였다. Ladd는 과압밀 점토인 경우 정규압밀 점토보다 큰 비배수 전단강도 값을 가진다고 제안하였고, Krey-Tiedemann¹⁾은 포화점토의 전단강도에 미치는 선행하중의 영향을 조사하기 위해 자연 점토의 함수비가 액성한계보다 커질 때까지 물을 가하여 충분히 반죽한 후 여러 가지 압밀하중으로 재 압밀하여 전단시험을 실시하는 등 그간 많은 연구자들이 현장 지반상태를 모사(模寫)하는 각종 시험결과의 분석과 이론해석 및 다양한 구성모델에 의한 수치해석 등을 통하여 지반의 압밀과 전단 변형의 문제를 다루어 왔으며, 그 결과 하중을 받는 점성토지반의 거동규명에 많은 진전이 있었다.

이러한 연약지반의 응력-변형률-전단강도 거동파악은 준설이나 매립을 통한 지반개량 및 기초구조물 설계시 부등침하나 압밀침하 등의 문제점 해결에 많은 도움이 되리라 판단된다. 따라서 본 연구에서는 선행하중을 받은 포화점토의 전단강도거동에 대하여 삼축압축시험을 통하여 규명하고자 한다.

1.2 연구방법 및 범위

본 연구에 사용된 시료는 경산시 진량읍 내리리 소재의 일원에서 채취한 시료를 #200체로 물과 함께 쳐서 수조에 침수시켜 물을 제거하고 점토입자를 채취하여 공시체를 성형하였다.

성형된 공시체에 각각 40, 100, 200, 300, 400, 500kPa의 선행하중을 가하여 완전히 침하가 끝났을 때 시료를 트레밍하여 완전자동삼축시험기를 이용해서 일정한 구속압력을 가하여 압밀비배수 전단시험을 실시하였다.

본 연구는 연약지반의 압밀에 의한 강도특성을 나타내고자 제안되었던 여러 압밀모델 이론에 따라 선행압밀응력을 받은 점토시료에 대하여 간극비의 변화에 따른 전단특성, 전단강도정수의 산정, 선행압밀응력과 간극비, 간극수압계수의 관계 및 압밀응력과 탄성계수와의 관계에 대하여 연구하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 Mohr - Coulomb의 파괴이론

토질 구조물의 파괴는 외력에 의하여 발생된 전단응력이 흙의 고유한 전단강도보다 크면 파괴된다. Mohr - Coulomb의 파괴기준은 지반이 전단파괴에 저항하는 강도를 정의한 공식이다. Mohr(1900)는 재료가 최대수직응력 또는 최대 전단응력에 의하여 파괴되는 것이 아니라, 수직응력과 전단응력의 임계결합으로 파괴된다는 파괴이론을 제안하였다. 즉, 재료내 임의 면의 전단응력이 그 재료의 전단강도와 같아질 때 파괴가 일어나며 전단응력은 그 응력이 생기는 면에 작용하는 수직응력의 함수라는 것이다. 따라서, 파괴면에서의 수직응력과 전단응력사이의 함수관계는 식 (2.1)로 표시할 수 있다.^{2,5)}

$$\tau_f = f(\sigma) \quad (2.1)$$

Fig 2.1과 같이 축차응력(deviator stress)

$\sigma_1 - \sigma_3$ 의 벡터를 직경으로 해서 원을 그리면 이것이 Mohr의 응력도(Mohr's circle of stress)이다. 즉,

$$O_S O_P = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$$

$$\text{응력도의 반경} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$$

원상의 임의의 점의 응력은 식 (2.2), (2.3)으로 나타낼 수가 있다.

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\theta \quad (2.2)$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\theta \quad (2.3)$$

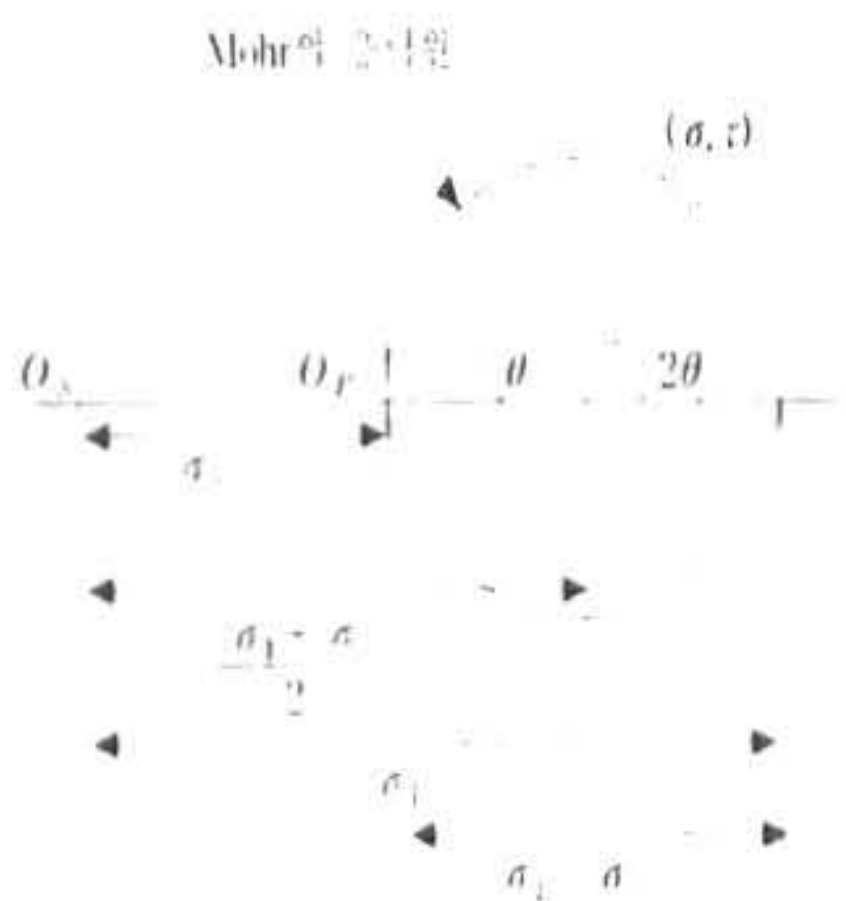


Fig 2.1 Mohr의 응력원

Mohr의 파괴이론에서는 파괴시의 응력상태를 표시하도록 여러개의 Mohr원을 그리면 이 원이 접하는 공통되는 선을 그릴 수 있는데 이것을 Mohr의 파괴포락선이라고 한다. 식 (2.1)로 정의된 파괴포락선은 Fig 2.2와 같이 포물선이다. 그러나 대부분의 토질역학 문제에 있어서는 파괴면에서의 전단응력을 1776년 프랑스의 기술자 Coulomb이 제안한 식 2.4와 같이 수직응력의 선형 함수관계로 나타낼 수 있다.

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (2.4)$$



Fig 2.2 Mohr의 파괴포락선과 Mohr-Coulomb 파괴기준

식 (2.4)는 Mohr의 파괴기준과 접목되어 사용되고 있으며, Mohr-Coulomb의 파괴기준이라 한다. 이와 같이 흙의 전단강도는 점착력과 내부마찰각으로 나타내어진다. 더욱이 점착력은 파괴면에 작용하는 수직응력의 크기에는 관계가 없고 주어진 흙에 대해서는 일정한 값을 갖는다. 그리고 내부마찰각은 흙의 특성과 상태가 정해지면 일정한 값을 나타낸다.

2.2 Hvorslev의 파괴이론

Mohr-Coulomb의 파괴기준에서는 강도정수를 전응력으로 정리할 경우에는 배수조건을 표시하여야 하고 유효응력으로 정리할 경우에는 정규압밀과 과압밀의 구별이 필요한 데 반하여, Hvorslev의 파괴기준에서는 강도정수를 파괴시의 공극비만의 함수로 일괄적으로 규정하고 있다.

Hvorslev^{3,4)}의 파괴기준에 의한 전단강도 τ_f 는 시험결과를 유효응력으로 정리하여 식 (2.5)과 같이 표시된다.

$$\tau_f = c_e + \sigma' \cdot \tan \phi_e \quad (2.5)$$

여기서 강도정수 c_e 및 ϕ_e 는 <Fig 2.3(a)>과 같은 압축곡선에서 같은 공극비를 갖는 정규압밀공시체 D와 과압밀공시체 E 및 F를 만들어 각각 비배수전단시험을 한 결과로부터 Fig 2.3(b)와 같은 Mohr의 응력도에서 D→E→F의 파괴포락선을 작도함으로서 구할 수 있다.

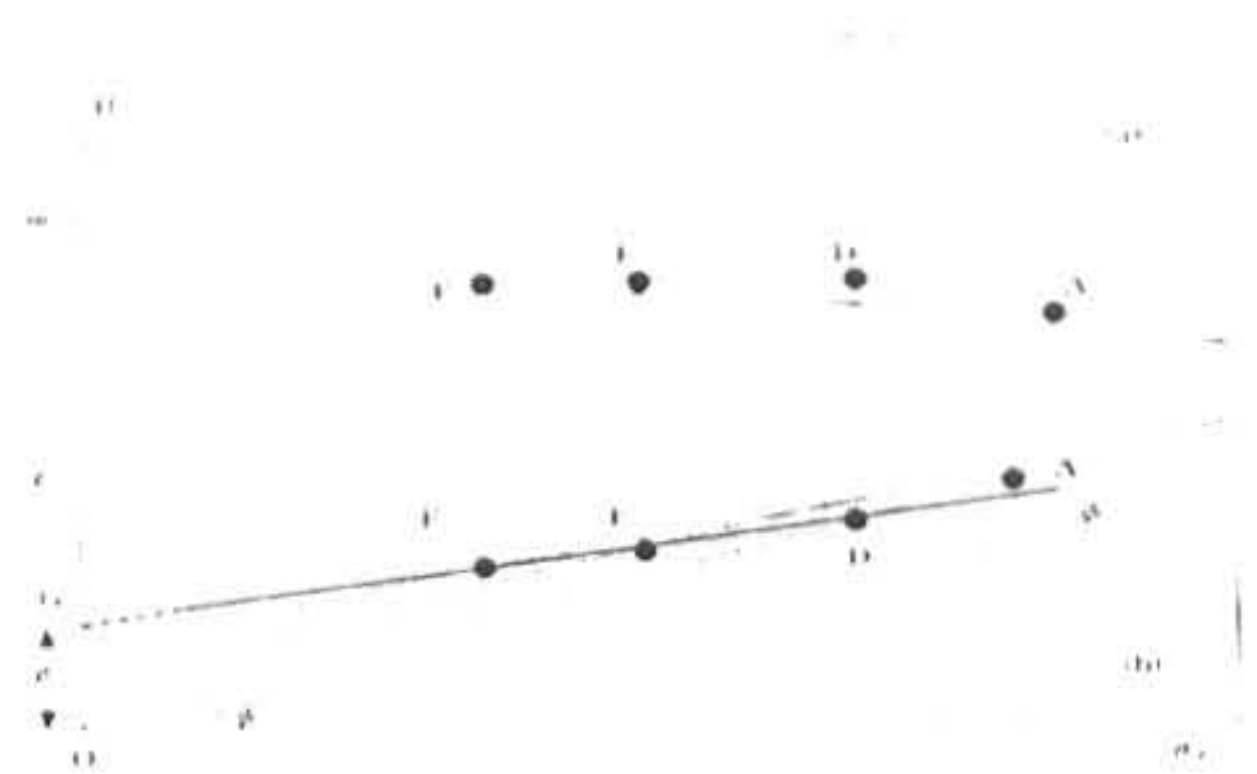


Fig 2.3 Hvorslev의 파괴기준

3. 실험방법

3.1 시료의 특성

경산시 진량면 내리리 소재의 일원에서 채취

한 시료를 #200체로 물과 함께 쳐서 수조에 침수시킨 후 물을 제거하고 점토입자를 채취하여 공시체를 성형하였다. 이 시료의 물리적인 성질을 알기 위하여 입도분석을 실시하고 USCS에 의하여 흙을 분류하였으며, KSF규정에 의한 물리실험과 압밀실험을 실시하였다. 본 실험에 사용된 시료의 물리적 성질은 Table 3.1 과 같고, 입경가적곡선은 Fig.6과 같다.

Table 3.1 시료의 물리적 성질

액성한계 ω_L	소성한계 ω_p	소성지수 I_p	비중 G_s	통일분류
36.84	23.44	13.40	2.56	CL

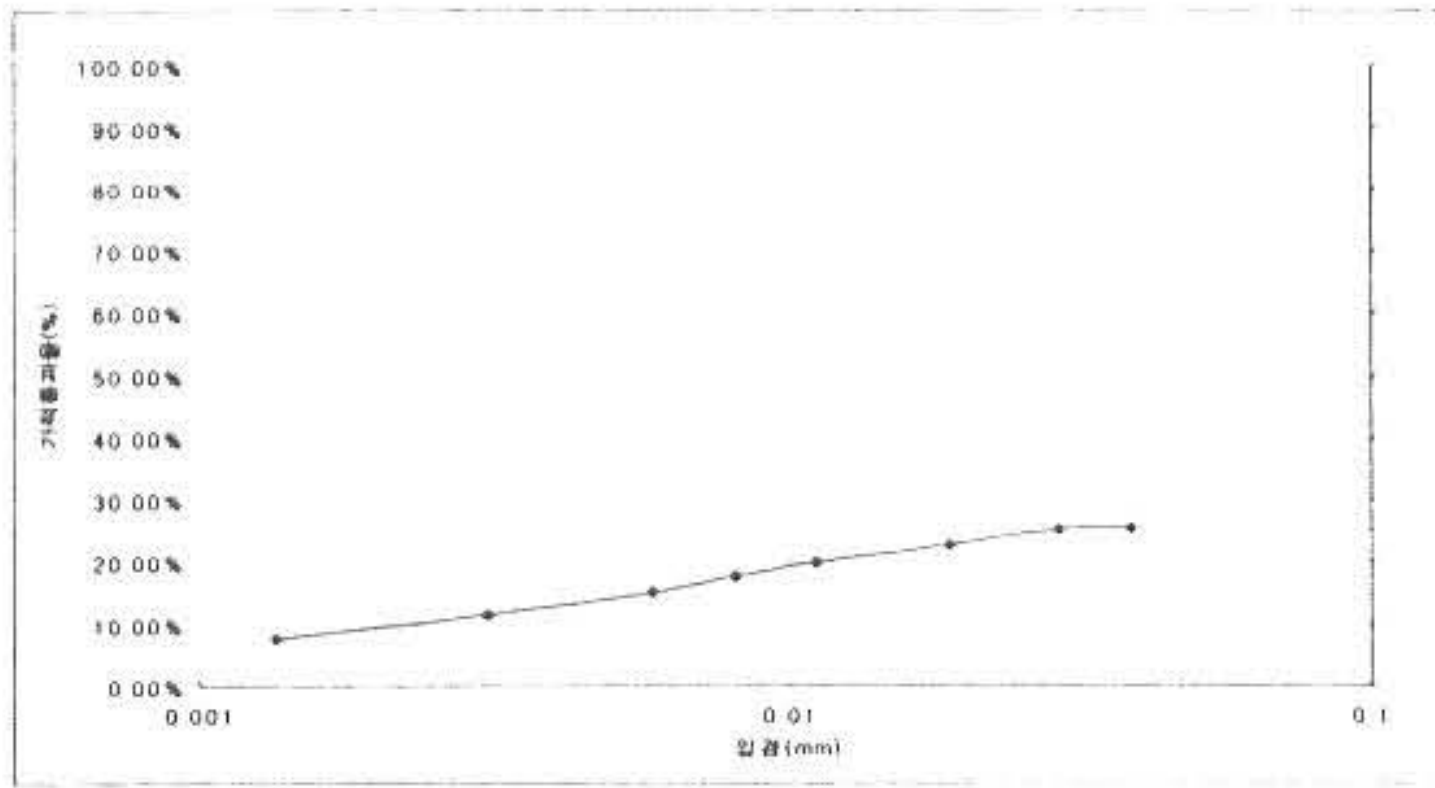


Fig 3.1 시료의 입경가적곡선

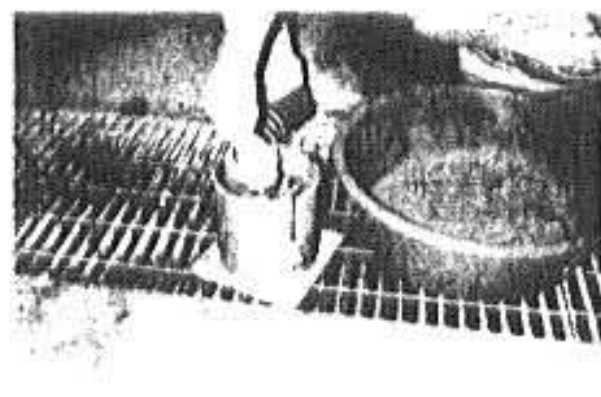
3.2 공시체의 제작

(1) 공시체의 제작방법

공시체는 직경 15cm, 높이 22.5cm인 몰드를 사용하였으며, 제작방법은 사진 3.1~5와 같다.



<사진 3.1>



<사진 3.2>

사진 3.1과 같이 경산시 내리리 소재일원에서 채취한 시료를 #200체로 물과 함께 쳐서 완전히 침하시킨다.

사진 3.2는 몰드의 저면에 유공판을 놓고 여과지를 깔아 배수에 지장이 없도록 한 후 미리

준비한 슬러리 상태의 시료를 넣고 시료의 윗부분에 여과지를 놓고 유공판을 올린 다음 배수에 지장이 없도록 망을 올린다.

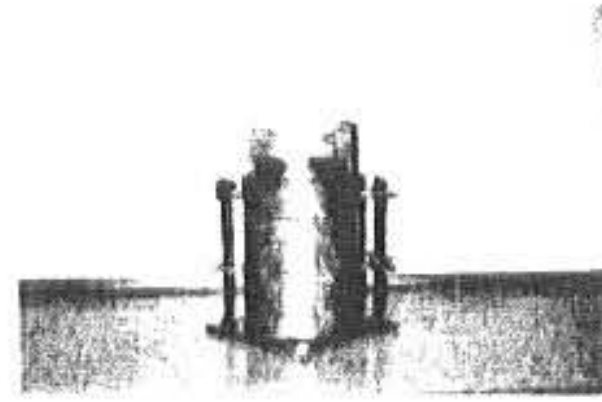


사진 3.3

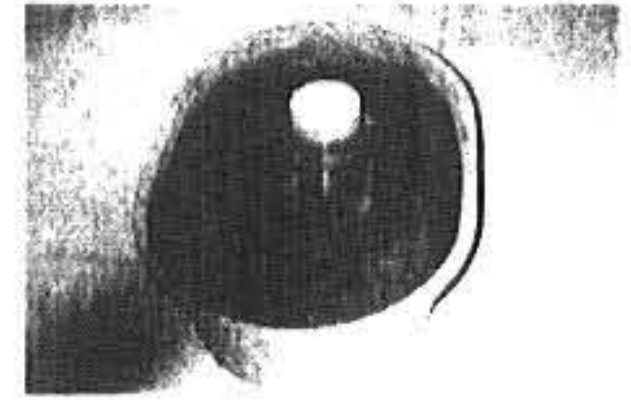


사진 3.4

사진 3.3과 같이 직경이 공시체 직경과 같고 높이 2cm 되는 하중판을 올려놓는다.

사진 3.4와 같이 제작된 공시체를 수조에 수침시킨 후 수침된 상태에서 낮은 압력을 가하여 24시간 이상 놓아둔다.

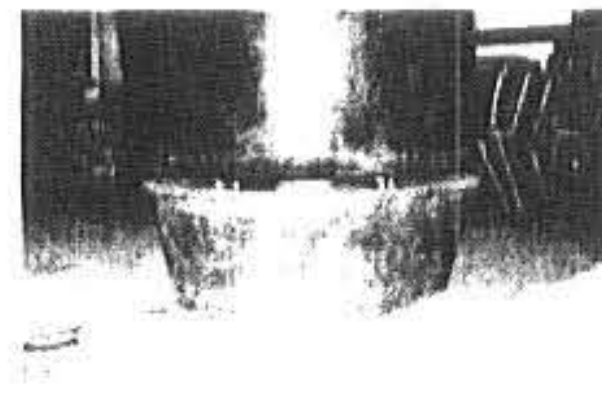


사진 3.5



Fig 3.2

사진 3.5와 같이 어느 정도의 강도가 생기면 수조를 이용하여 40, 100, 200, 300, 400, 500kPa의 하중강도가 되도록 하중을 가하여 침하가 정지할 때까지 압밀을 한다. Fig. 3.2는 공시체 제작의 개요도를 나타내었다.

위 과정을 거쳐 6개의 각기 다른 하중강도로 압밀된 공시체를 직경 5cm, 높이 10cm인 시료를 사진 3.6~7과 같이 각각 4개씩 성형하여 24개의 시험공시체를 제작하였다. Fig 3.3은 시료 추출 개요도이다. 실험공시체 성형에 사용된 시료의 나머지 시료를 이용하여 기본 실험을 실시하였다. 공시체의 제작시기는 각각의 하중단계마다 4개의 시료가 얻어지므로 하나의 시료는 실험에 사용하고 나머지는 추출관에 함수비의 변화가 없도록 잘 밀봉하여 보관하였다.

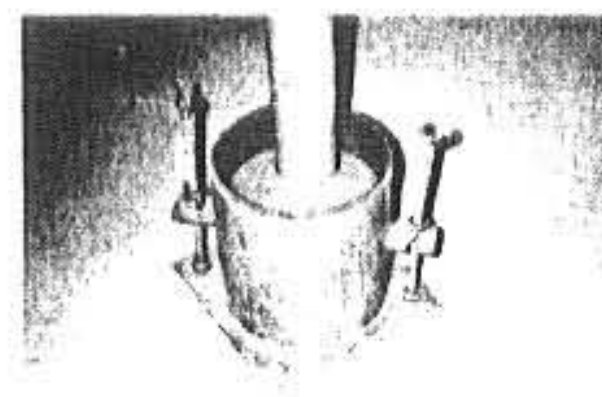


사진 3.6



사진 3.7

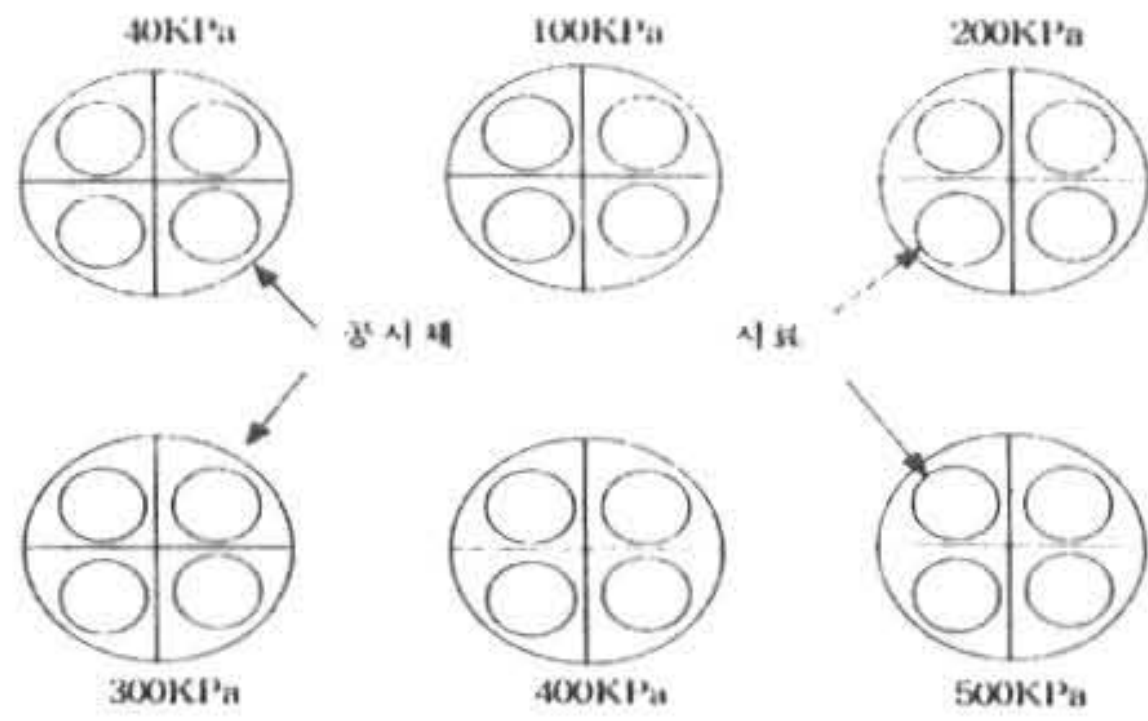


Fig 3.3 공시체로부터 시료추출 개요도

(2) 공시체의 특성

Fig 3.3과 같이 만들어진 공시체는 자연시료를 사용하는 것보다 동일한 입도의 시료를 얻을 수 있으며, 시료제작이 수침한 상태에서 이루어지므로 포화에 걸리는 시간을 단축시킬 수 있다. 또한 포화도도 높게 얻을 수 있을 뿐만 아니라 공시체내의 함수비와 밀도가 균일하게 분포되는 이점이 있다. 그리고 시료의 입도조성을 인위적으로 할 수 있으므로 실험조건에 따라 입도의 조성을 조절할 수 있는 장점을 지니고 있다.

(3) 공시체의 응력검증

공시체 제작시의 압밀하중과 동일한 선형응력을 유지하는지에 대하여 검증하기 위해 압밀실험을 실시하였다. 함수비는 공시체의 상단과 하단 및 중앙의 시료를 채취하여 측정하였고, 압밀실험을 실시하여 Table 3.2와 같은 성과표를 얻었다. 성과표를 보면 압밀시험에서 얻어진 선형하중은 가해진 선형응력과 거의 비슷한 값을 나타내었다. 함수비와 간극비는 압밀응력이 증가함에 따라 시료가 압밀이 되었으므로 비례적으로 감소하고 있다. 실험에 의해 얻어진 성과는 선형하중이 직접 작용하는 상단이 조금 더 하중을 받은 것으로 나타났으나 그 차이는 미소하므로 평균치를 사용하였다.

Table 3.2 압밀실험 성과

선형압밀응력 (kPa)	40	100	200	300	400	500
함수비(ω)	38.59	31.57	28.09	26.46	26.22	25.54
선형하중(P_c)	54	118	203	304	401	492
간극비(e)	0.988	0.808	0.719	0.677	0.671	0.654

이상의 결과에서 살펴보면 제작된 공시체의 물리적 특성이 일반적인 점성토의 토질특성과 유사하므로 본 실험의 시료로 적합하였다.

2.3 실험방법

(1) 삼축압축시험기 제원

본 연구에서 사용된 삼축시스템은 미국 GEOCOMP Corporation의 Allen Marr가 개발한 완전자동화 삼축시험기(Fully Automated Triaxial Testing System)이다. 이시험기는 각각의 셀과 샘플에 압력과 체적변화량을 측정, 제어할 수 있고 시료에 응력과 변형률을 제어할 수 있는 시스템을 내장한 Flow Trac II units 부분과 변위와 하중을 측정하고 시료에 축차응력을 제어할 수 있는 시스템을 내장한 Load Trac II load frame 부분 그리고 실제로 실험이 실시되는 실행부분인 시료를 포함한 Triaxial test chamber 부분으로 구성되어 있다. 이러한 장치들은 Triaxial test software를 포함한 컴퓨터시스템과 네트워크로 연결되어 모든 실험과정과 결과저장은 컴퓨터의 제어 하에 자동으로 이루어지며, K_0 압밀, 등방압밀, 비등방압밀, 정적전단, 동적전단 응력경로시험 등을 다양한 배수조건과 제어방법(응력제어, 변형률제어)에 따라 실시할 수 있다.

(2) 삼축압축시험 방법

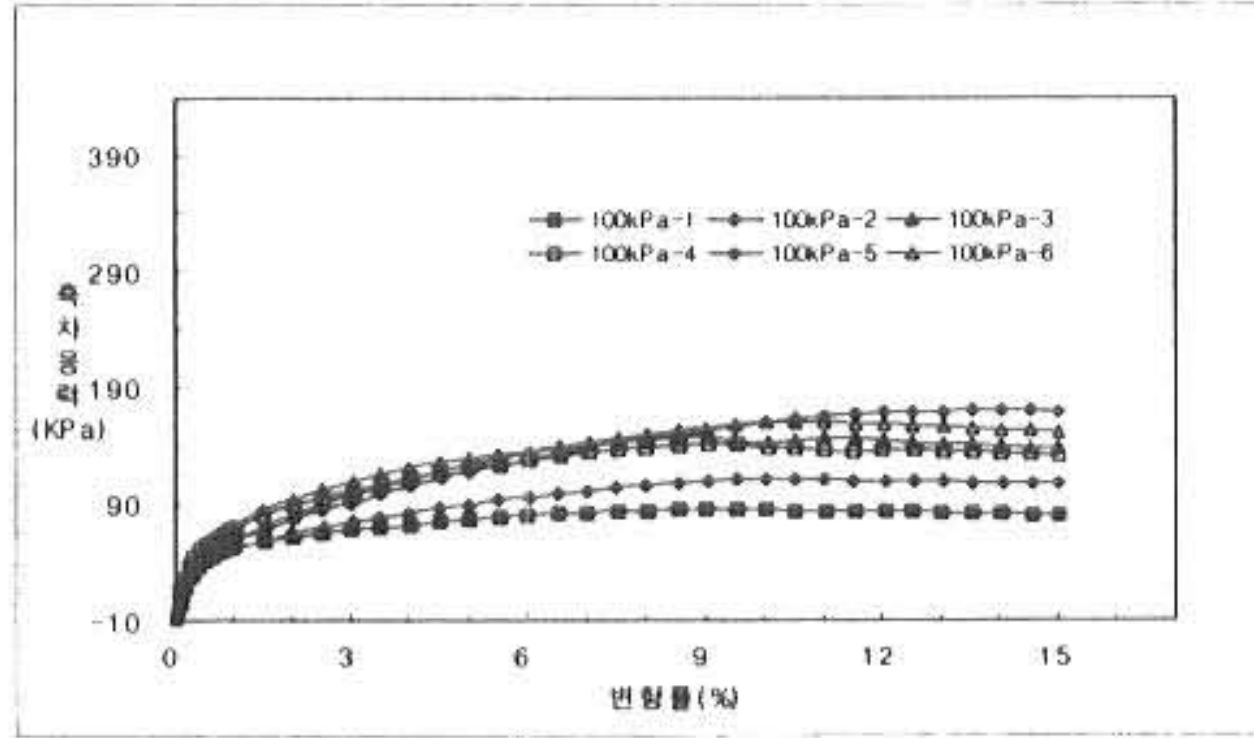
본 실험은 등방압밀 압밀비배수(CU)실험으로 소정의 구속응력하에서 압밀을 실시하고, 서서히 축변형을 가하여 시료에 작용하는 전응력과 간극수압을 측정함으로써 유효응력을 얻을 수 있는 변형률제어법으로 시행되었다.

공시체 제작시의 조건을 유지하기 위하여 구속압력을 각각의 시료제작시의 압밀하중과 같은 크기로 가하고 배압은 압밀하중의 1/2을 하루 동안 가하여 재 포화시켰으며, 포화도는 간극수압계수를 이용하여 $B \geq 0.95$ 가 되면 포화가 된 것으로 보았다. 완전 포화된 공시체를 시료 제작시의 압밀응력인 40, 100, 200, 300, 400, 500kPa과 같은 크기의 구속압력을 가하여 등방압밀 시켜 공시체 제작시 수침된 몰드와 같은 상태로 유지되게 하였다. 각각의 선형압밀된 시료에 100, 150, 250, 400kPa의 구속응력을 가하여 압밀이 완료될 때까지 등방압밀 시켰다. 압밀이 완료된 후 비배수조건에서 축방향 변형속도를 0.02mm/min로 하여 파괴시켰다.

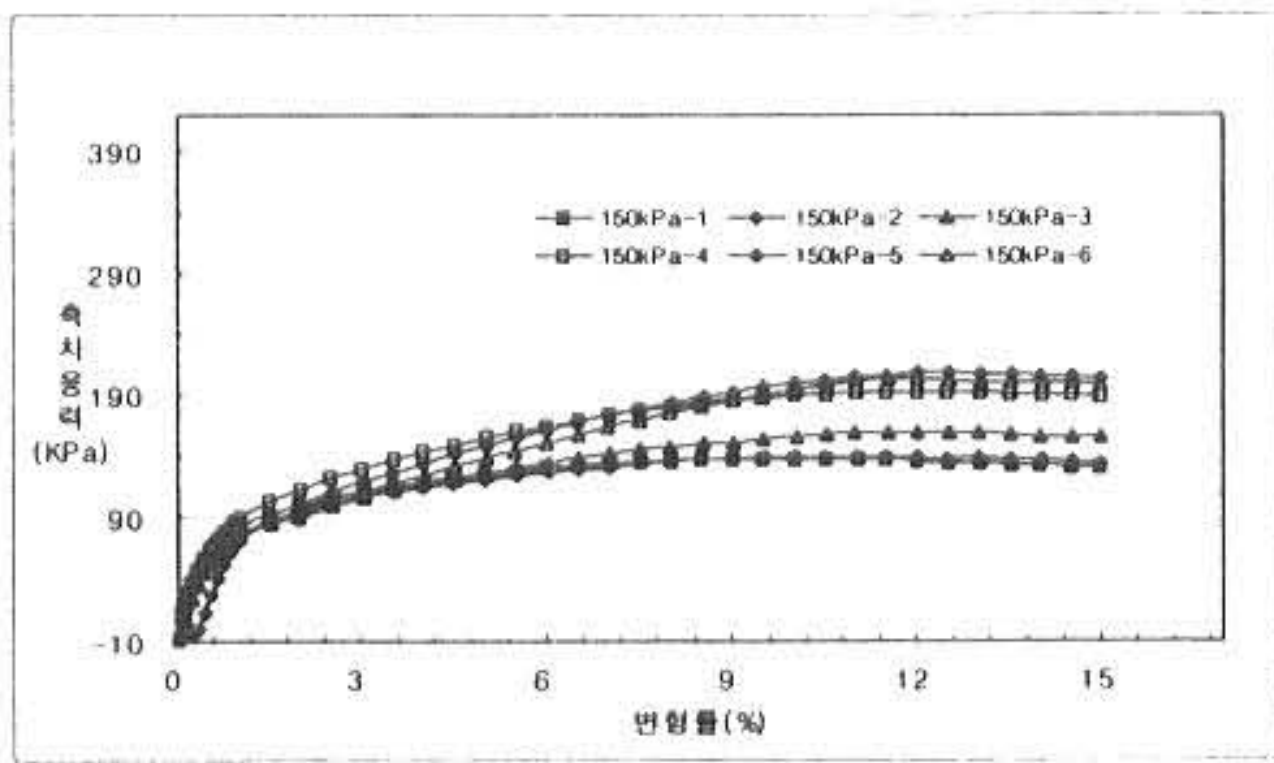
4. 결과 분석

4.1 선행압밀응력과 축차응력

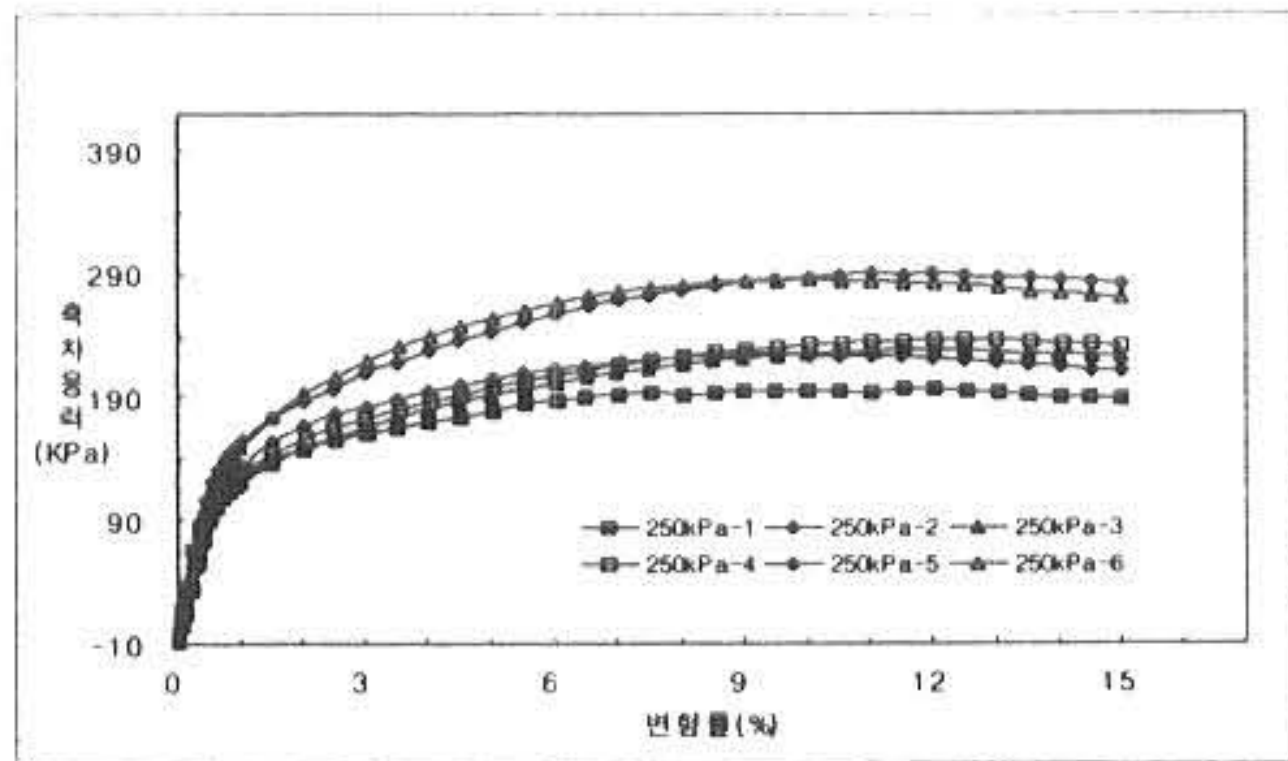
선행압밀응력에 따른 구속응력이 100, 150, 250, 400kPa 일 때의 응력-변형률 곡선을 Fig 4.1에 도시하였다.



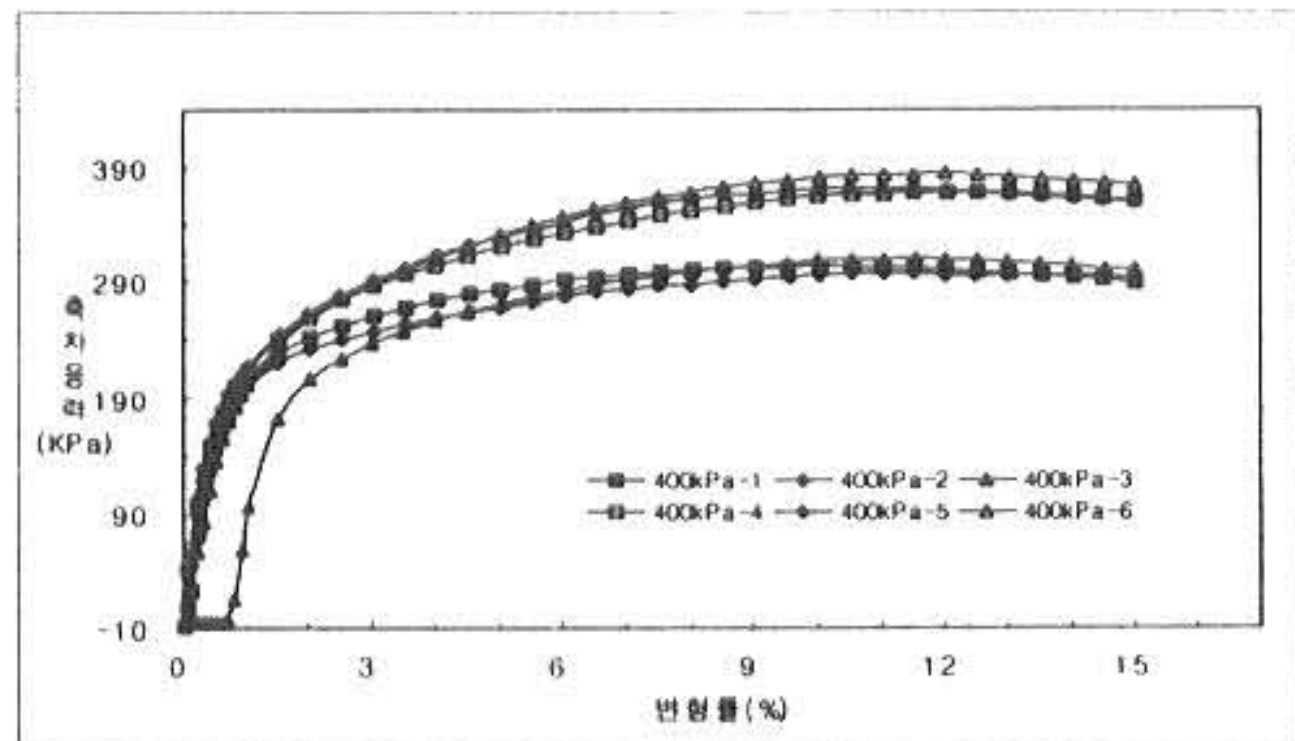
(a) 구속응력 100kPa



(b) 구속응력 150kPa



(c) 구속응력 250kPa



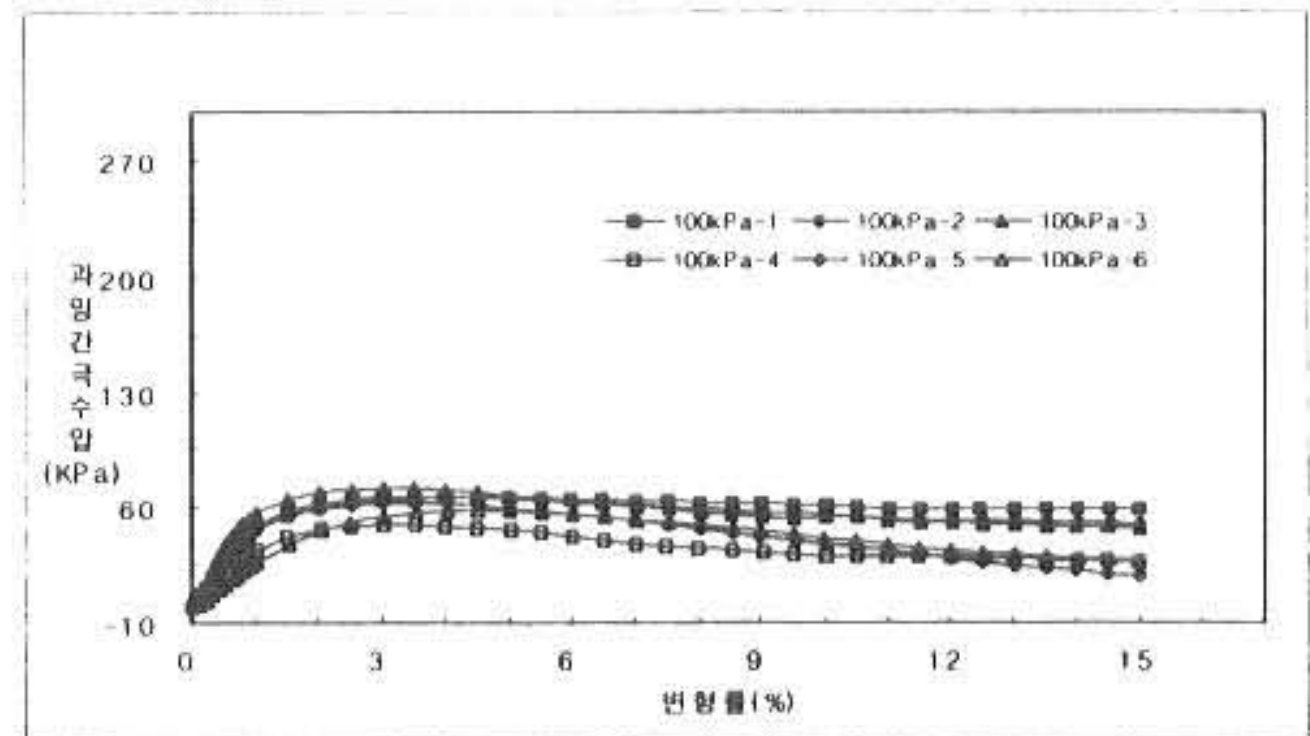
(d) 구속응력 400kPa

Fig 4.1 선행압밀에 따른 변형률-응력

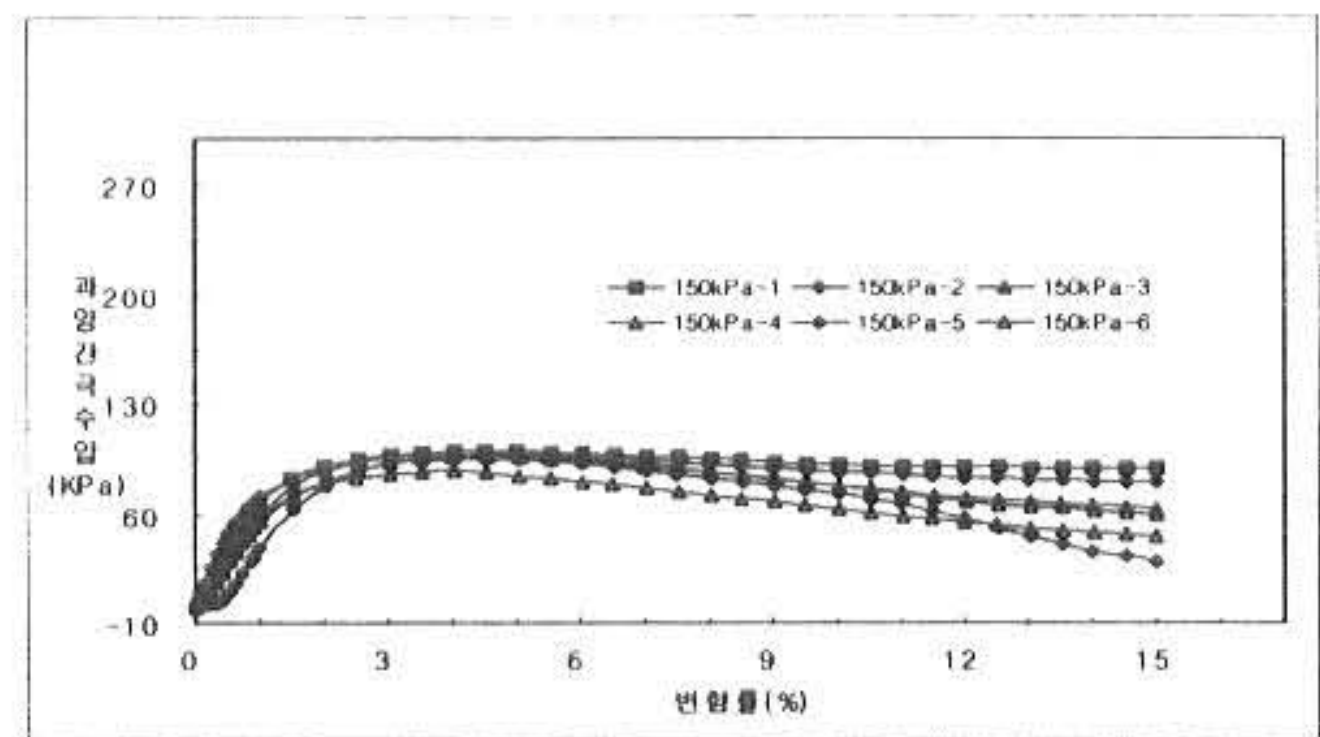
Fig 4.1에서 볼 수 있는 바와 같이 선행압밀하중이 증가함에 따라 축차응력이 증가하며 이에 이르는 변형률은 감소되는 경향을 보인다. 또한 300, 400, 500kPa의 선행압밀하중을 받은 상태에서는 축차응력이 현저히 증가함을 나타낸다. 이는 구속응력이 선행압밀하중보다 작은 상태에서는 과압밀상태에서의 점성토의 진점착력에 의한 강도특성임을 알 수 있다.

4.2 선행압밀응력과 과잉간극수압

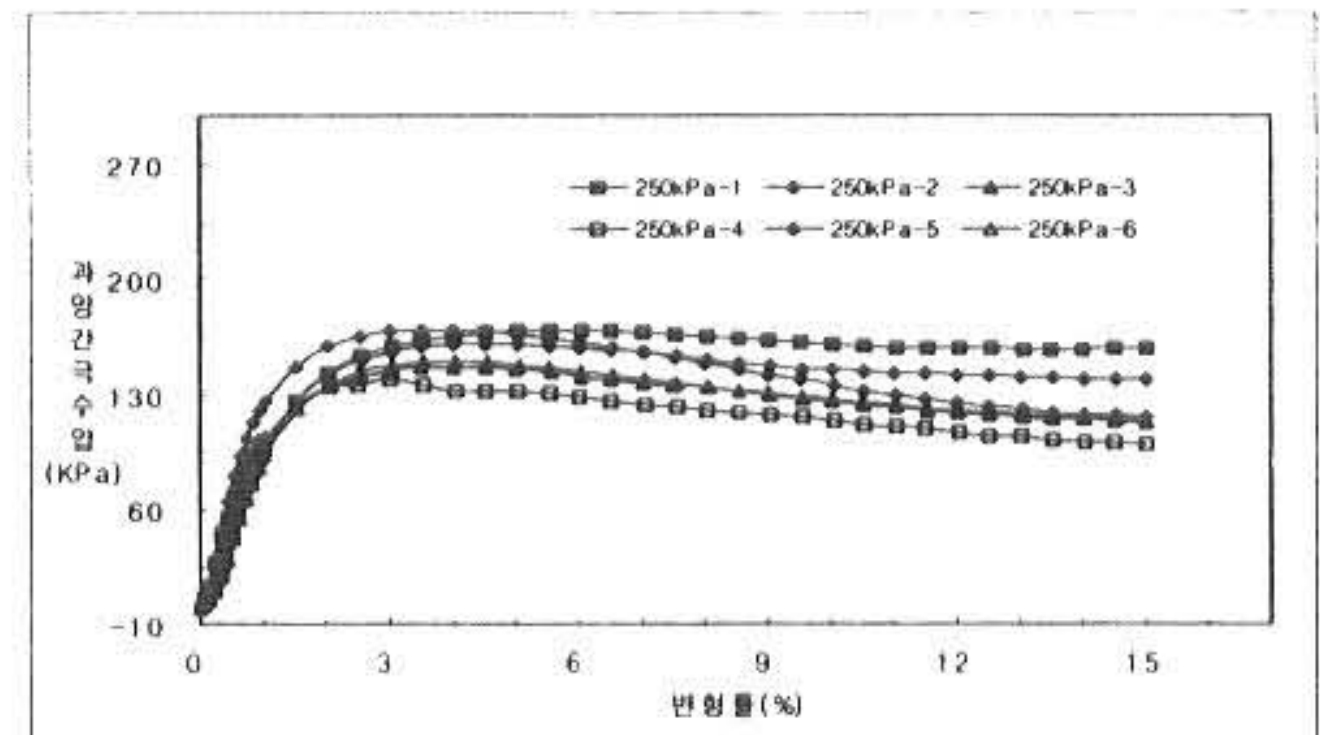
선행압밀응력에 따른 구속응력이 100, 150, 250, 400kPa일때의 과잉간극수압-변형률 곡선을 Fig 4.2에 도시하였다.



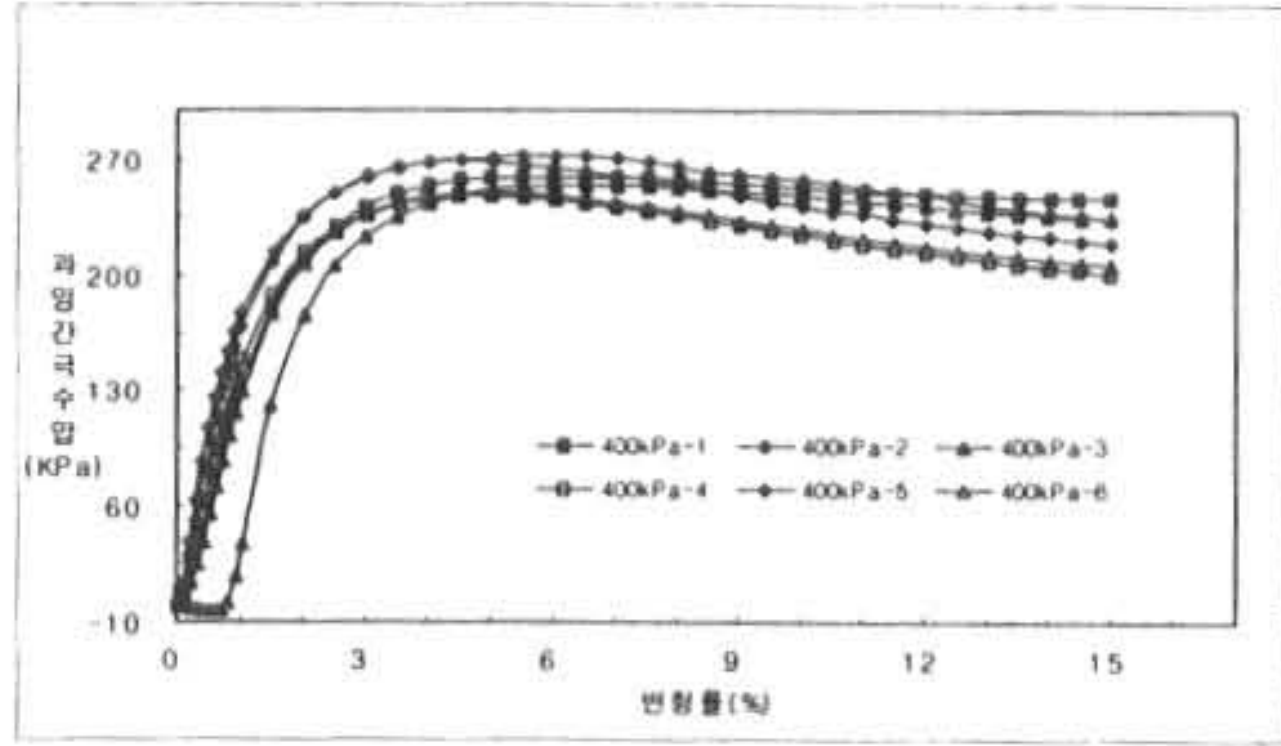
(a) 구속응력 100kPa



(b) 구속응력 150kPa



(c) 구속응력 250kPa



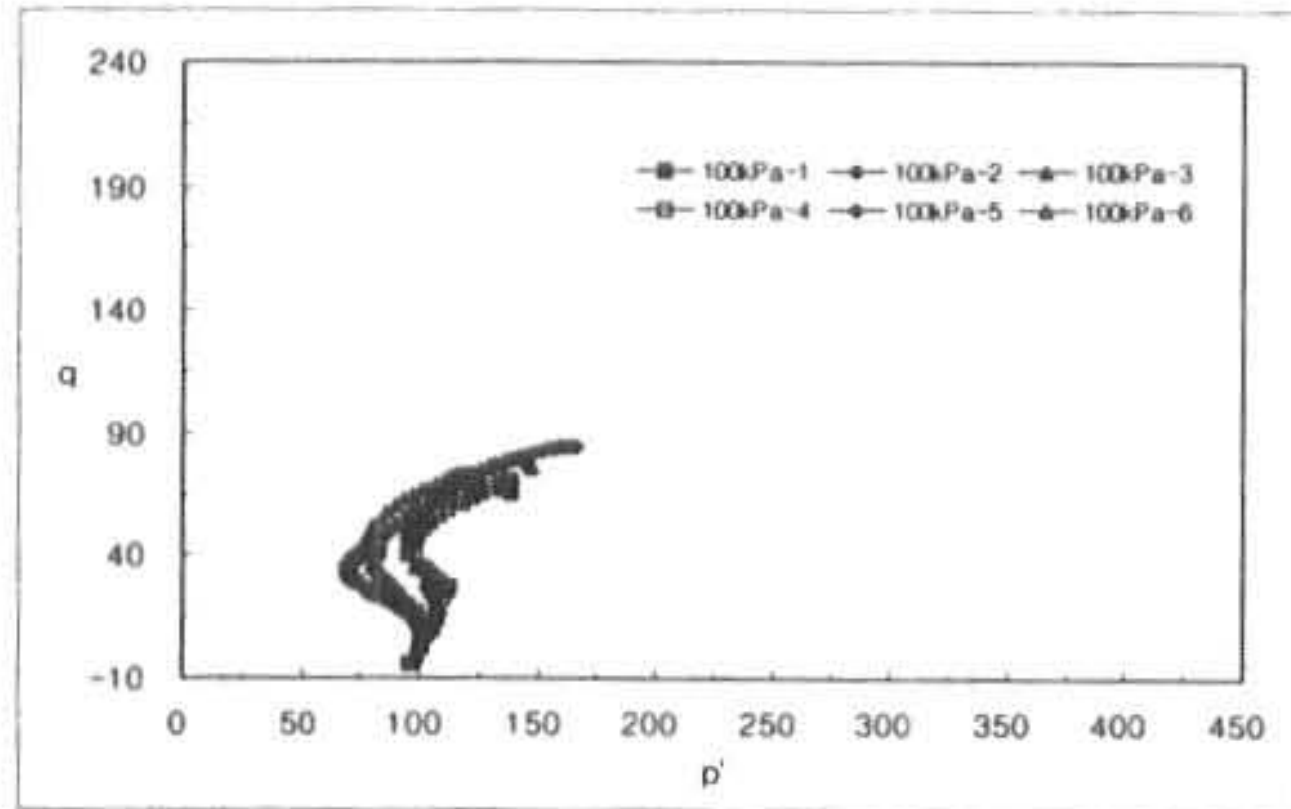
(d) 구속응력 400kPa

Fig 4.2 선형압밀에 따른 변형률-과잉간극수압

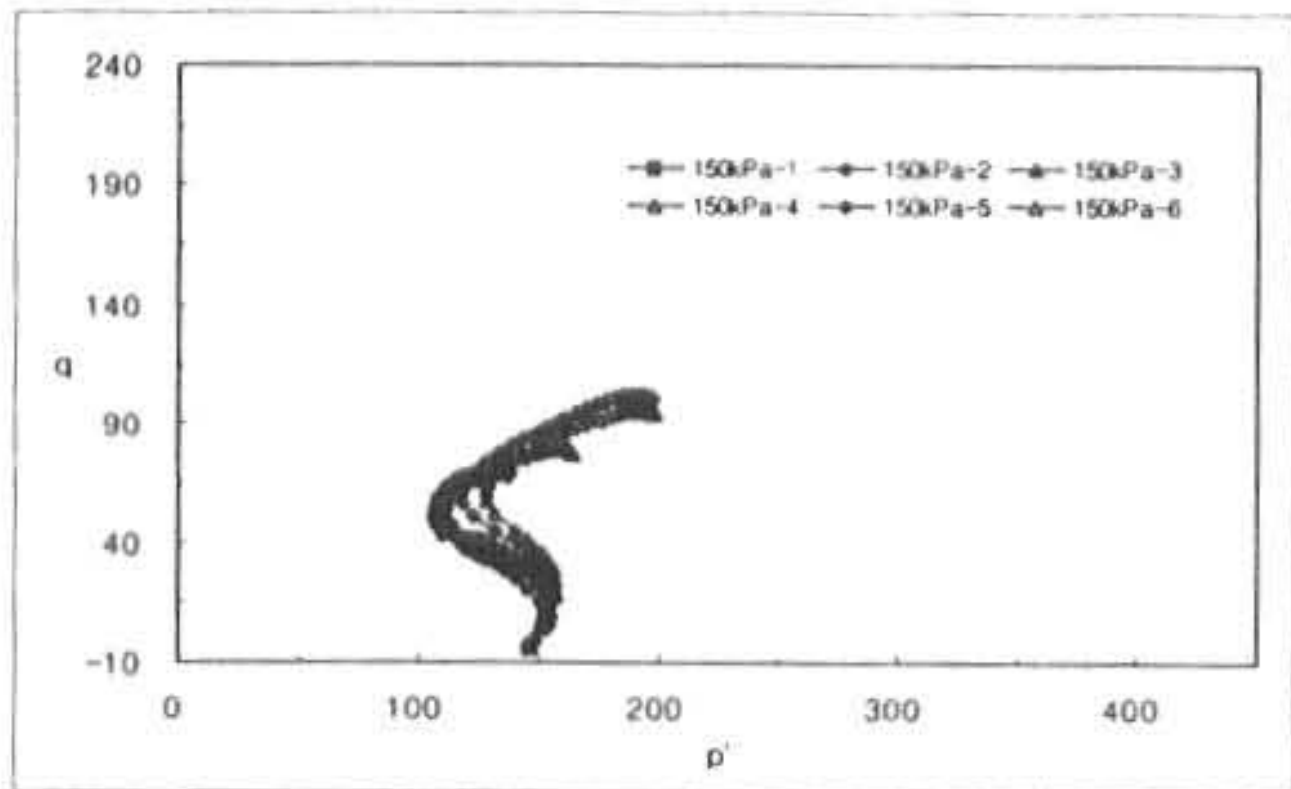
Fig 4.2에서 알 수 있듯이 선형압밀응력이 증가하면 같은 구속응력상태에서 과잉간극수압이 선형압밀응력의 크기에 비례하여 감소함을 알 수 있다. 또한 과압밀상태의 시료들은 과잉간극수압이 현저히 감소하였는데, 이러한 특성은 점성토의 간극비 감소에 의하여 Rowe와 Roscoe가 제시한 다이러턴시 효과에 의하여 간극수압이 감소함을 나타내고 있다.

4.3 선형압밀응력과 응력경로

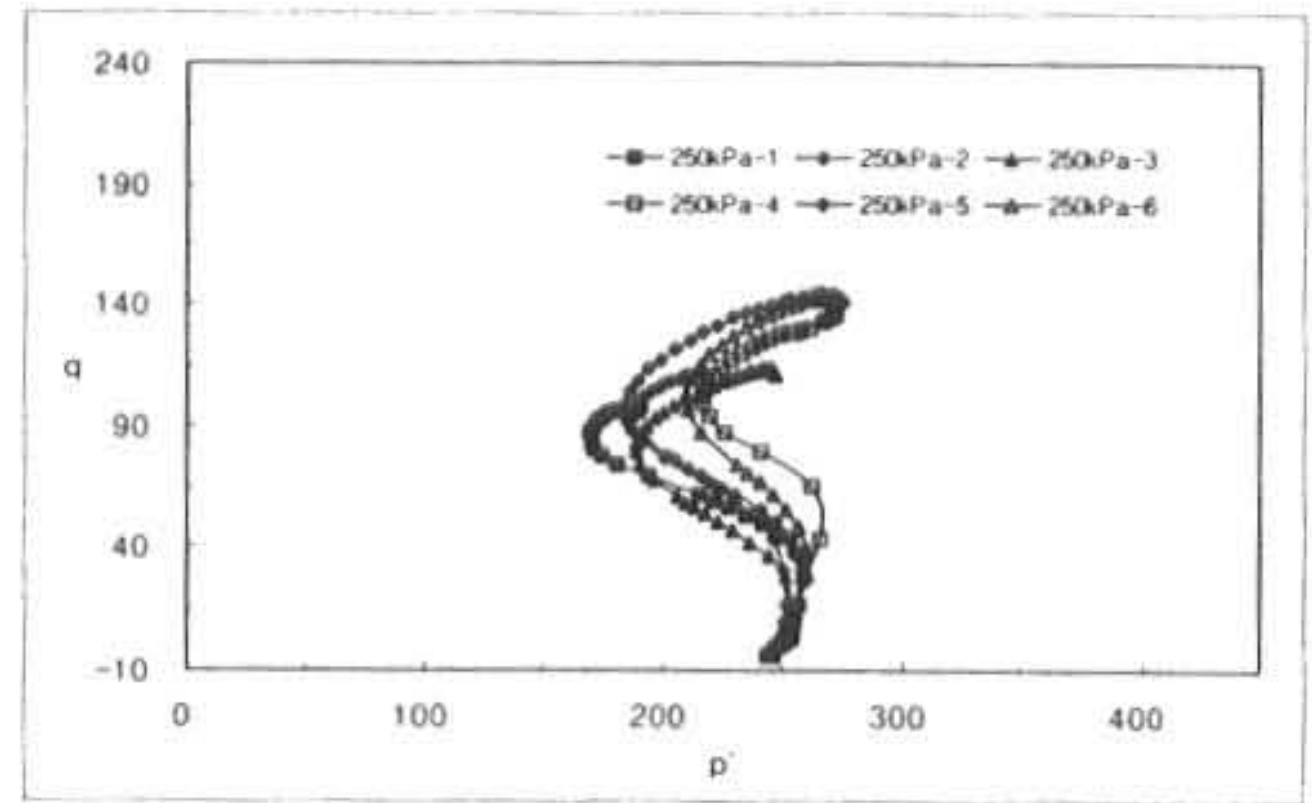
선형압밀응력에 따른 구속응력이 100, 150, 250, 400kPa일 때의 응력경로의 곡선을 Fig 4.3에 도시하였다.



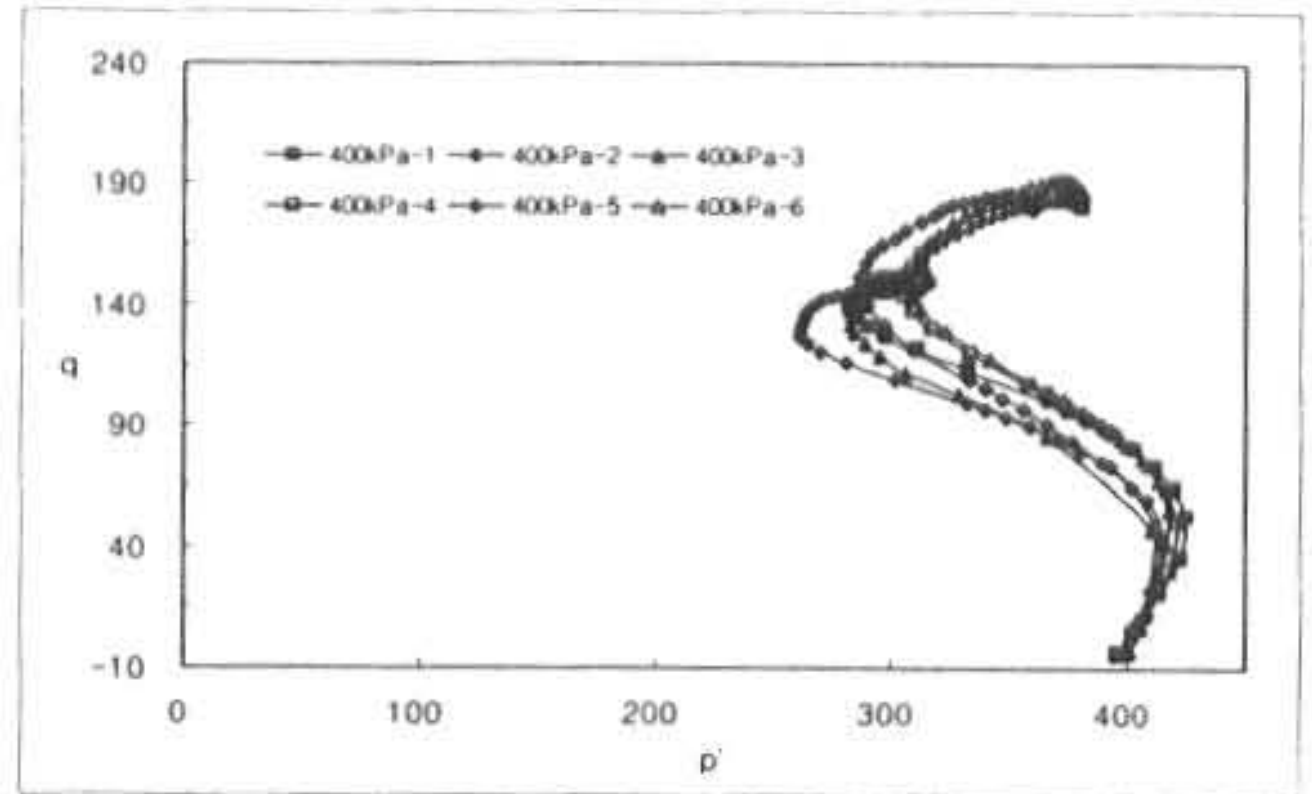
(a) 구속응력 100kPa



(b) 구속응력 150kPa



(c) 구속응력 250kPa



(d) 구속응력 400kPa

Fig 4.3 선형압밀에 따른 응력경로

Fig 4.3에서 보는 바와 같이 선형압밀응력이 증가할수록 응력경로가 압밀 비배수실험에 의한 응력경로에서 배수실험에 의한 응력경로의 형태로 변화되어 가는 것을 알 수 있으며, 전단강도도 증가함을 알 수 있고, 특히, 100, 150kPa의 구속응력에서 선형압밀응력이 300, 400, 500kPa를 받은 점토의 경우 과압밀상태의 응력경로 형태로 나타남을 알 수 있다.

4.4 선형압밀응력과 간극수압계수 (A_f)

선형압밀응력이 40, 100, 200, 300, 400, 500kPa일 때의 선형압밀응력/압밀응력 (p_o/p)과 간극수압계수 (A_f)와의 관계를 살펴보면 Table 4.3과 같다.

Table 4.3 간극수압계수

	40kPa	100kPa	200kPa	300kPa	400kPa	500kPa
A_f	0.657	0.467	0.354	0.218	0.127	0.232
	0.636	0.569	0.420	0.275	0.308	0.322
	0.772	0.631	0.511	0.469	0.431	0.434
	0.808	0.821	0.769	0.567	0.625	0.556
p_o/p	0.2158	0.4730	0.8084	1.2453	1.4822	1.5357
	0.1391	0.3444	0.6468	0.8763	1.1249	1.1305
	0.0896	0.2104	0.4185	0.5777	0.7391	0.7474
	0.0568	0.1431	0.2814	0.3905	0.5179	0.5099

Fig 4.4에서 선행압밀응력/압밀응력(p_o/p)과 간극수압계수(A_f)의 관계에서 A_f 는 선행압밀의 영향을 크게 받는 것을 알 수 있다. 따라서 과압밀비(OCR)가 클수록 비배수전단 동안에 과잉간극수압이 거의 발생하지 않는다는 것을 증명해 준다.

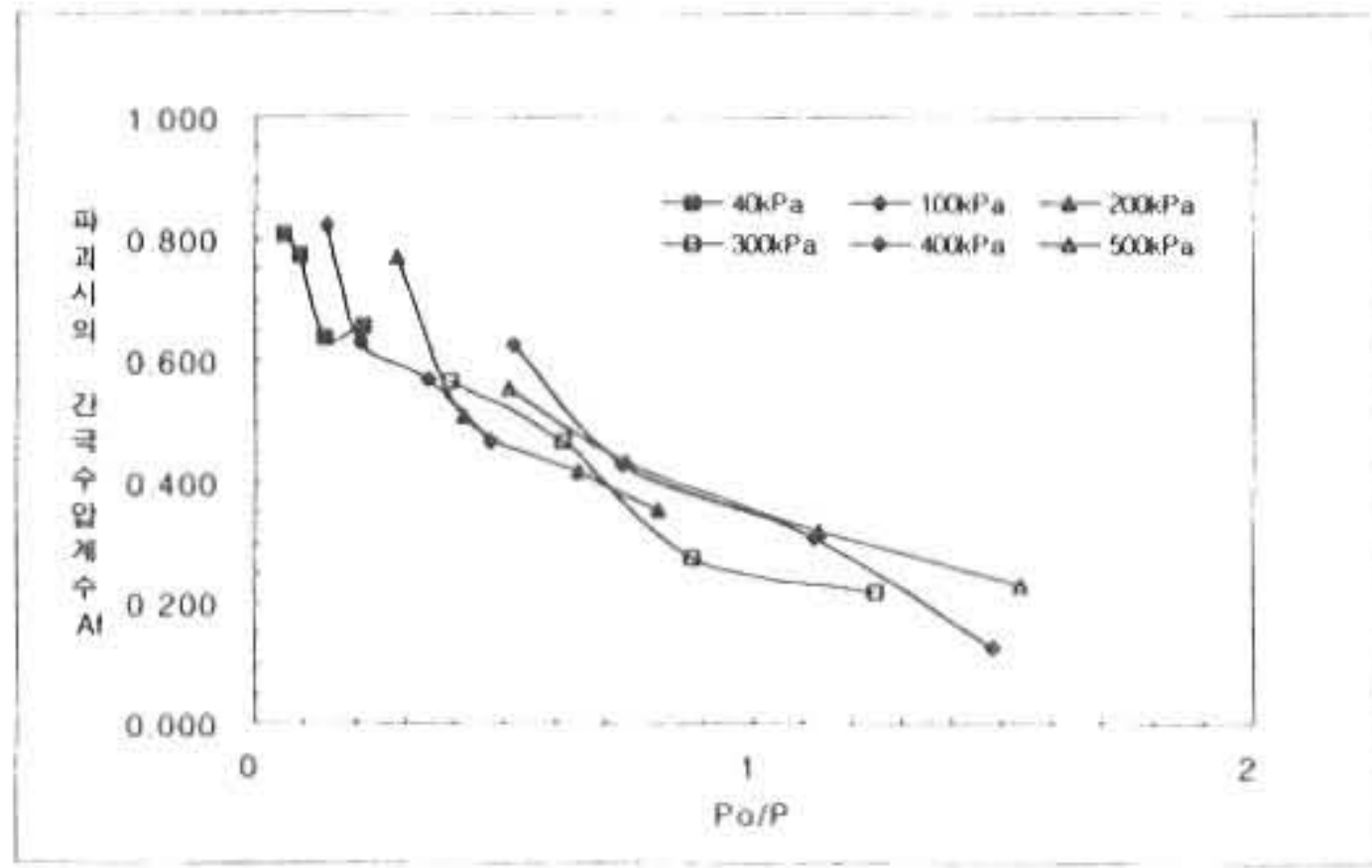


Fig 4.4 $p_o/p - A_f$ 의 관계

5. 결론

본 연구는 다른 선행압밀응력을 받은 점토시료에 일정구속압력을 이용하여 압밀비배수 삼축압축시험을 실시하고 간극비, 간극수압계수, 전단강도 및 탄성계수의 변화관계를 분석하여 타 이론과 비교, 연구하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 선행압밀응력과 축차응력의 관계에서 같은 구속응력에서 선행압밀응력이 증가하면 축차응력이 비례하여 증가하였다.
2. 선행압밀응력과 과잉간극수압의 관계에서 선행압밀응력이 증가하면 같은 구속응력상태에서 과잉간극수압이 선행압밀응력의 크기에 비례하여 감소함을 알 수 있다. 또한 과압밀상태의 시료들은 과잉간극수압이 현저히 감소하였는데 이는 다이러턴시 효과에 의한 것이라고 볼 수 있다.

3. 선행압밀응력과 응력경로의 관계는 선행압밀응력이 증가할수록 전단강도가 증가함을 알 수 있고, 특히, 100, 150kPa의 구속응력에서 선행압밀응력이 300, 400, 500kPa를 받은 점토의 경우 과압밀상태의 응력경로 형태로 나타났다.

4. OCR과 A_f 의 관계에서 A_f 는 선행압밀응력에 역비례관계를 나타내며, OCR이 클수록 비배수전단 동안에 과잉간극수압이 거의 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다.

참고문헌

- 1) Krey-Tiedemann, W.G. (1949). Consolidation of clay Soil by means of Atmospheric Pressure, Conf. on Soil. Stabilization in MIT, 1-6.
- 2) Das, Braja M.(1999). Principles of Geotechnical Engineering, 3th Edition PWS Publishing Company.
- 3) Hvorslev, M.J.(1949). Subsurface Exploration and Sampling for Civil Engineering purposes, WES.
- 4) Hvorslev, M.J.(1960). Physical Components of the Shear Strength of Saturated Clays, Colorado : Proc. Res. Conf. Shear Strength of Cohesive Soils, 169-273.
- 5) Lambe, T. W, & Whitman, R. V.(1986). Soil Mechanics, SI Version. John Willey & Sons, Inc

(2003년 4월 14일 접수, 2003년 8월 20일 채택)