

삼축압축시험을 통한 응력이력에 따른 전단거동의 변화

Effect of the stress history on the shear behavior using a Triaxial compression test

김승한¹⁾, Seung Han Kim, 최성근²⁾, Sung Keun Choi, 이문주³⁾, Moon Joo Lee, 이우진³⁾, Woo Jin Lee

- ¹⁾ 고려대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Korea University
²⁾ 고려대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Korea University
³⁾ 고려대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Korea University
⁴⁾ 고려대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea University

SYNOPSIS : In this study, anisotropically consolidated undrained shear(CAU) test was performed to examine the variation of the shear strength according to the stress history. The specimen having 30% relative density was homogenously prepared, and 200KPa of back pressure was applied to increase the B value more than 0.95. To make NC specimens, the vertical stress was applied on the specimen by 100KPa, 200KPa and 400KPa, and to make OC specimens, the vertical stress was applied upto 400KPa and was reduced to 200KPa and 100KPa resulting in OCR 2 and 4 respectively. The test result indicates the shear strength for the OC specimens are slightly higher than that of the NC specimens at the same confining pressure. The elastic modulus varies according to the confining stress and considerably affected by preconsolidation stress.

Key words : Triaxial test, K_0 consolidation, Undrained shear, Phase transformation, Critical void ratio

1. 서 론

본 연구에서는 응력이력에 따른 균산지역 모래의 비배수전단강도 변화양상을 관찰하기 위하여 비배수 비등방압밀 삼축시험(CAU)을 실시하였다. 상대밀도 30%의 균일한 시료를 삼축셀에 조성한 후, 배압을 200KPa까지 가하여 0.95이상의 B값을 갖도록 포화시킨 후 연직하중 100, 200, 400KPa의 K_0 상태로 압밀시킨 정규압밀(NC)모래와 연직하중을 400KPa까지 가한 후 200, 100KPa까지 제하시킨 OCR 2, 4의 과압밀(OC)모래에 대한 비배수전단시험을 실시하여 전단강도 및 탄성계수에 미치는 영향을 분석하였다.

2 이론적 배경

2.1 삼축압축(CKC)시험기

삼축압축시험은 원주상의 시료에 축방압을 가한 후 축하중을 증가시켜 Stress-Strain Relationship을 알아보는 시험으로서, isotropic 및 K_0 consolidation, drained 및 undrained shear test 등 다양한 종류의 시험수행이 가능하다. 삼축압축시험기의 간략한 모식도는 다음의 그림1에 나와 있다.

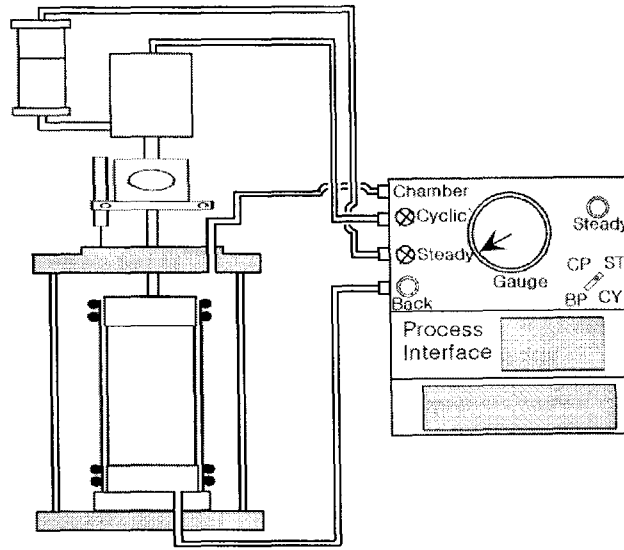


그림1. CKC삼축압축장비 모식도

2.2 등방압밀된 시료의 비배수전단시험에 대한 이론적 배경

2.2.1 정상상태(Steady State) 및 상전이(Phase Transformation)

Steady State란 모래시료의 비배수전단시 유효응력의 변화 및 간극수의 유출입이 없는 상태를 말한다. 즉, 축변형이 발생하는 상황에서 유효응력의 변화가 발생하지 않게 된다. 아래의 그림 2는 등방압밀된 상태에서 전단응력을 가한 시료에 대한 평균유효응력-축차응력 관계곡선(p' - q diagram)이다. ㉔와 같이 조밀한 모래시료에서는 전단시 평균유효응력(p')에 변화가 거의 없음을 확인할 수 있다. ㉔와 같이 느슨한 경우에는 ㉔와 같은 명확한 steady state가 관찰되지 않고 최소의 평균유효응력을 나타내는 지점이 나타나는데, 이 점은 시료가 부피수축거동(contractive behavior)에서 팽창거동(dilative behavior)으로 바뀌는 지점과 일치하며 이 점을 상전이점(Phase Transformation Point)이라고 명명하였다.(Ishihara 등, 1975))

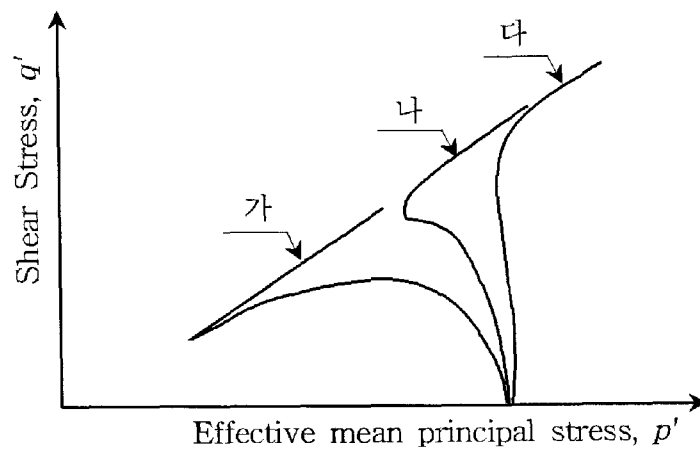


그림 2. 등방압밀된 시료에서의 상대밀도에 따른 전단시의 응력경로

2.2.2 유사정상상태(Quasi Steady State) 및 극한정상상태(Ultimate Steady State)

전 절에서 steady state에 대하여 기술하였는데, 이는 그림2의 ㉔와 같은 조밀한 모래시료에서 나타나는 현상이다. 하지만 느슨한 모래시료에 대해서도 상전이(Phase Transformation)가 발생할 때 일시적으로나마 정상상태(steady state)가 나타나므로 이 점을 유사정상상태(Quasi steady State)라고 한다.(Alarcon-Guzman, 1988) 또한, 동일한 상대밀도를 갖는 시료를 대상으로 압밀을 각기 다른 응력조건으로 시킨 경우 그림 3과 같은 경향을 보이게 된다. 그림 3에서 전단변형률(Shear Strain)이 커짐에 따라 압밀응력에 상관없이 일정한 선으로 모이게 됨을 알 수 있다. 이 상태를 극한정상상태(Ultimate Steady State)라고 하며 이 선을 극한정상상태선 (USSL, Ultimate Steady State Line)이라고 한다. 즉, USSL은 압밀응력에는 영향 받지 않으며 상대밀도에 좌우된다는 것을 알 수 있다.

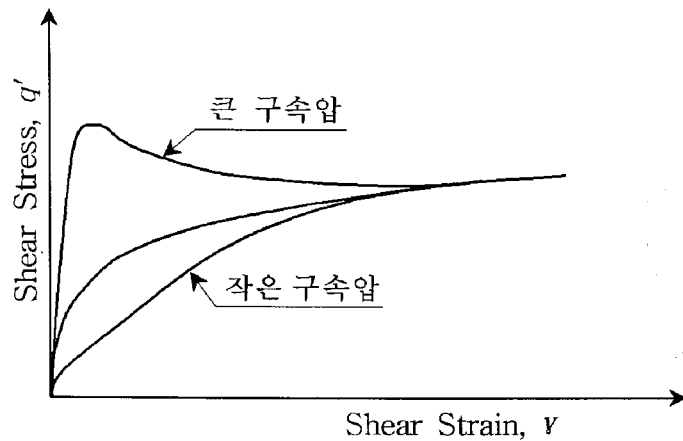


그림 3. 동일한 상대밀도에서의 구속압에 따른 전단시의 응력경로

2.2.3 한계간극비(Critical Void Ratio) 및 한계응력비(Critical Stress Ratio)

Vaid and Chern(1985)에 의해 제안된 한계간극비(Critical Void Ratio)는 포화된 모래시료에 대한 비배수전단시험에서 연화거동(Strain Softening)이 시작되는 점으로 정의하였다. 동일한 압밀응력으로 동방압밀된 상대밀도가 서로 다른 시료별 전단거동을 응력경로상에 나타낸 그림 4에 한계간극비점을 연결해 도시한 한계응력비선(CSR line)이 나타나 있으며 이는 원점을 지남을 알 수 있다. 전단시 한계응력비선을 지나면 연화거동이 발생하며, 연화거동은 상전이선을 만나기 전까지 계속됨을 볼 수 있다.

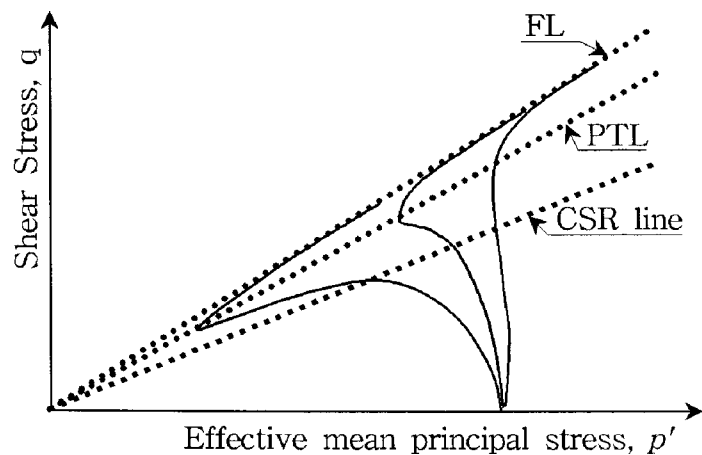


그림 4. 응력경로상의 파괴포락선, 상전이선, 한계응력비선

2.3 탄성계수(Modulus of Elasticity)

탄성계수는 축방향변형률에 대한 축차응력의 비를 나타내는데, 초기값을 기준으로 하는가 전체적인 값을 기준으로 하는가에 따라 초기탄성계수(Initial Tangent Modulus)와 접선탄성계수(Tangent Modulus)로 나뉜다. 접선탄성계수(Tangent Modulus) E_t 는 변형률에 대한 축차응력의 변화량이므로 아래의 식1과 같은 편미분방정식으로 표현된다.

$$E_t = \frac{\partial(\sigma_1' - \sigma_3')}{\partial \epsilon} \quad (1)$$

일반적으로 탄성계수는 OC상태에서 더 큰 값을 나타내는데, 이는 수평응력이 NC상태일 때보다 훨씬 큰 값을 보이기 때문에 파괴포락선에 도달하기까지 응력경로가 큰 기울기를 나타내기 때문이다.

3. 시험방법

3.1 시료의 조성

본 연구에서는 일반적으로 수행되는 사질토에서의 undrained shear test procedure를 따랐다. 시료의 조성단계부터 간략히 소개하면 다음과 같다. 먼저 시료를 조성하기 위해 건조된 사질토를 삼축용 latex membrane 내에 균질하게 조성하였다. 시료의 균질성을 위하여 내경 71mm의 PVC pipe와 직경 71mm로 절단한 8번체(2.360mm)를 조합해 일정한 높이에서 낙사시키는 Pluviation 방법을 도입하였으며, 조성된 시료를 육안으로 확인한 결과 재료분리 등 시험의 오차로 작용할 수 있는 요소들이 현저히 줄어들었음을 확인할 수 있었다. 시료의 포화는 2단계로 이루어졌다. 첫째 단계에서는 Carbonated Water를 통수시켜 CO₂ gas가 공극에 매워진 공기를 밀어낼 수 있도록 하였으며 두 번째 단계에서는 美. Nold社에서 제작한 Deairator를 사용해 만들어진 증류수를 통수시켜 높은 포화도를 얻을 수 있도록 도모하였으며 각 시험은 B-value 0.97이상인 경우에 한하여 수행되었다. 단, 모든 시료에 200KPa의 배압을 적용했는데, 그 이유는 100KPa 이하의 배압에서는 조밀한 상대밀도에서 부피팽창거동으로 인하여 간극수압이 -1atm(-101.3KPa)이하가 될 경우 Cavitation이 발생할 수 있기 때문이다. 한편 군산사의 기본물성치는 비중 2.67, 최대 및 최소건조단위중량 1.60 및 1.27로써, 상대밀도 30%에서의 건조단위중량은 1.354이며 이때의 간극비는 0.8049이다. 다음의 그림5에는 군산사의 입도분포가 나와있다.

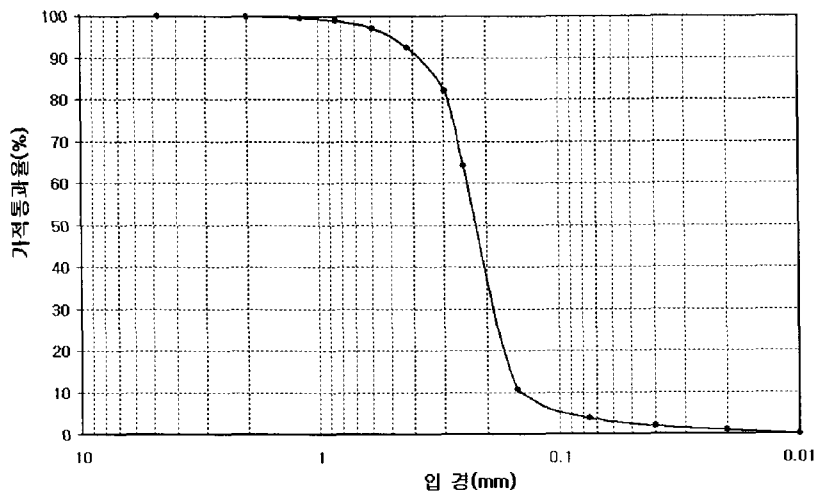


그림 5. 입도분포곡선

3.2 시험방법

앞에서 소개한 방법으로 조성된 시료를 K_0 상태로 압밀하여 비배수전단강도를 측정하기 위해 CAU(Consolidate Anisotropically Undrained shear) 삼축압축을 실시하였으며 아래의 표1과 같은 조건에서 수행되었다.

표1. K_0 압밀조건(배압은200kPa로 동일)

시험번호	K_0 압밀조건		전단조건
	σ_1'	구분	
1	unconfined *	NC상태	strain rate : 0.1%/min undrained shear
2	100KPa		
3	200KPa		
4	400KPa		
5	400KPa에서 200KPa로 제하(OCR2)	OC상태	
6	400KPa에서 100KPa로 제하(OCR4)		
7	400KPa에서 50KPa로 제하(OCR8)		

* UU-test를 수행하기 위한 시료의 unconfined 상태에서는 시료붕괴를 방지하기 위한 최소의 횡방향응력만을 가함

4. 시험결과

4.1 상전이선 및 한계응력비선

비등방압밀시킨 군산지역 모래시료를 비배수전단시켜 파괴시의 응력상태를 관찰한 결과 아래와 같은 최대-최소주응력 관계곡선 및 응력경로선을 구할 수 있었다. 그림6 및 그림7은 100, 200, 400KPa로 비등방압밀시킨 후 전단시험을 실시한 결과를 도시한 그래프이며, 그림8 및 그림9는 400KPa까지 비등방으로 압밀시킨 후 연직방향응력을 200KPa 및 100KPa로 제하하여 각각 OCR2 및 OCR4의 과압밀상태로 만든 후 전단시험을 실시한 결과를 도시한 그래프이다.

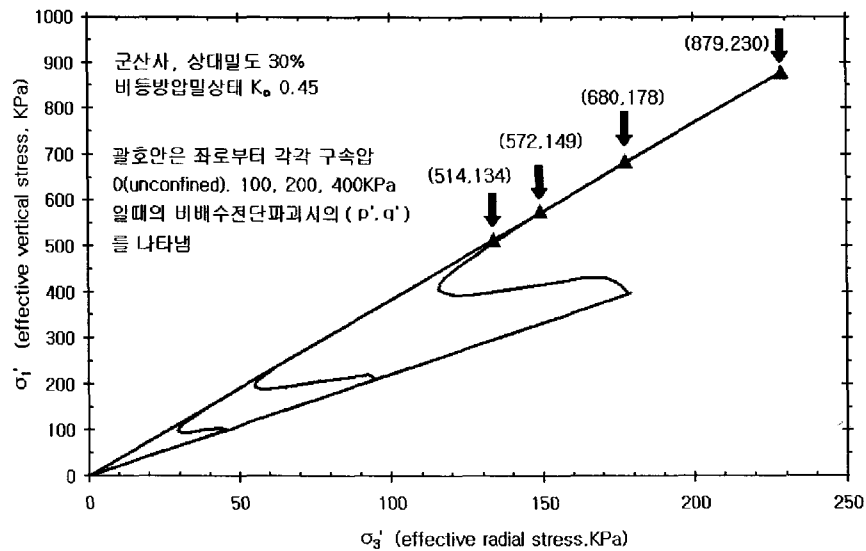


그림 6. NC상태 비등방 압밀 및 전단시험시의 최대-최소주응력 관계선

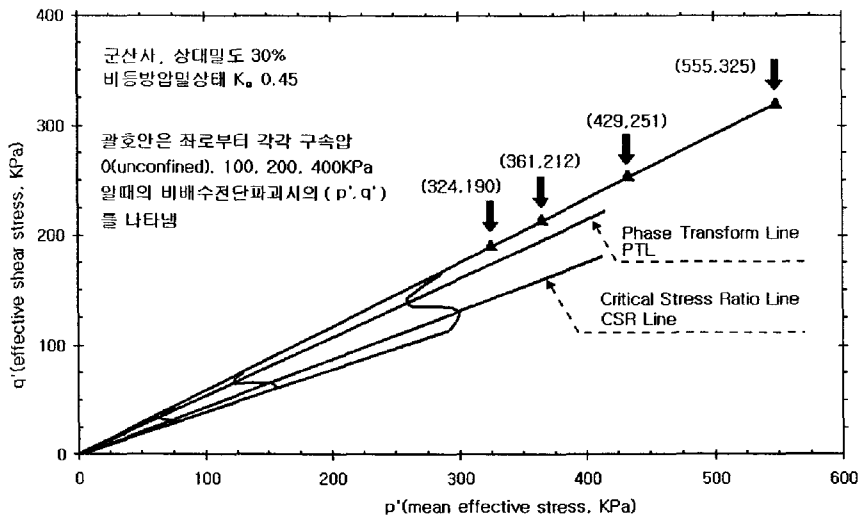


그림 7. NC상태 비등방 압밀 및 전단시험시의 응력경로(p'-q' diagram)

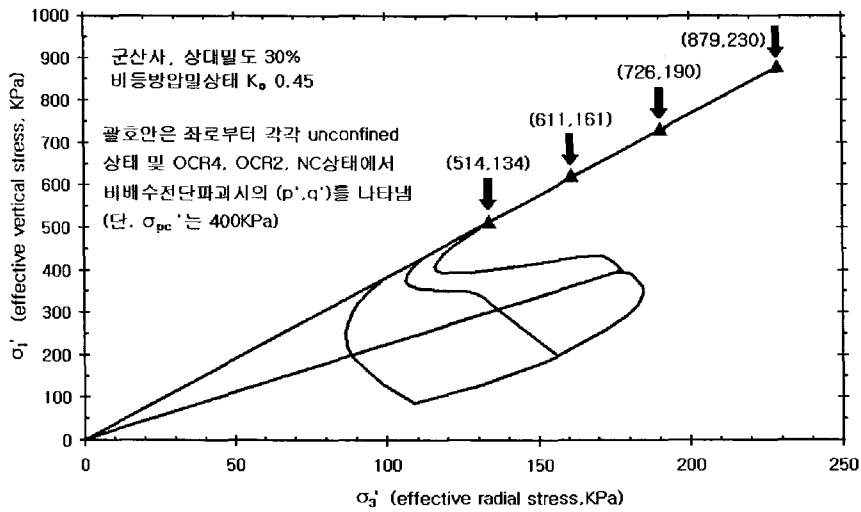


그림 8. OC상태 비등방 압밀 및 전단시험시의 최대-최소주응력 관계선

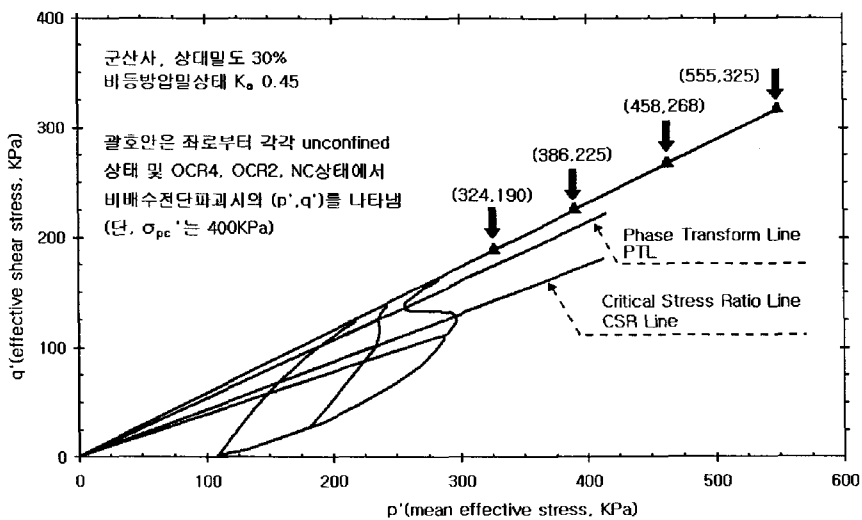


그림 9. OC상태 비등방 압밀 및 전단시험시의 응력경로(p'-q' diagram)

위의 그림을 관찰해보면 NC상태에서 각 시험의 최대-최소주응력선에 기준하여 구한 토압계수 K_0 는 0.45였으며, 응력경로를 통해 구한 마찰각 ϕ' 은 30.4°로 산출되었다. 상전이선과 한계응력비선은 각 구속압별 상전이점 및 한계응력점을 이어 도시하였을 때 모두 원점을 지나 실험조건을 잘 만족시키고 있음을 알 수 있었다. NC 및 OC상태 모두 응력경로상에서 상전이선의 ϕ'_{PT} 는 28.5°, 한계응력비선 ϕ'_{CSR} 은 23.7°로 산출되었다. 응력이력에 따른 전단시험시 파괴점은 다음의 표2와 같다.

표2. 전단시험시 구속압별 전단강도

NC상태		OC상태		비고
구속조건 (연직응력)	파괴응력 (p',q')	구속조건 (연직응력)	파괴응력 (p',q')	
unconfined	324,190	-	-	-
100KPa까지 재하	361,212	100KPa까지 재하	386,225	OC상태에서 전단강도 6.9% 증가
200KPa까지 재하	429,251	200KPa까지 재하	458,268	OC상태에서 전단강도 6.7% 증가
400KPa까지 재하	555,325	-	-	-

4.2 탄성계수(Modulus of Elasticity)

연직방향변형률과 축차응력을 초기 0.05%변형률까지만 고려하여 할선탄성계수(Secant Elastic Modulus)를 구할 수 있었다. 0.05%까지 NC상태에서는 탄성범위에 속하였다. OC상태에서는 OCR이 커질수록 탄성범위가 크게 늘어났다. OCR2 및 4인 경우 축방향변형률 0.12 및 0.30%까지 탄성거동을 보였다. 탄성계수는 아래의 그림 10에 표로 정리되어 있으며 횡방향응력에 대하여 변화양상이 도시되어있다.

표3. 전단시험시 구속압별 전단강도

연직방향응력	수평방향응력(K_0 상태)	E(KPa)	E(t/m^2)
Unconfined		15.8×10^3	1610
100Kpa	45	21.6×10^3	2200
200KPa	90	34.8×10^3	3550
400KPa	180	63.6×10^3	6490
400KPa 압밀후 200KPa까지 재하	156	68.4×10^3	6980
400KPa 압밀후 100KPa까지 재하	110	61.2×10^3	6240

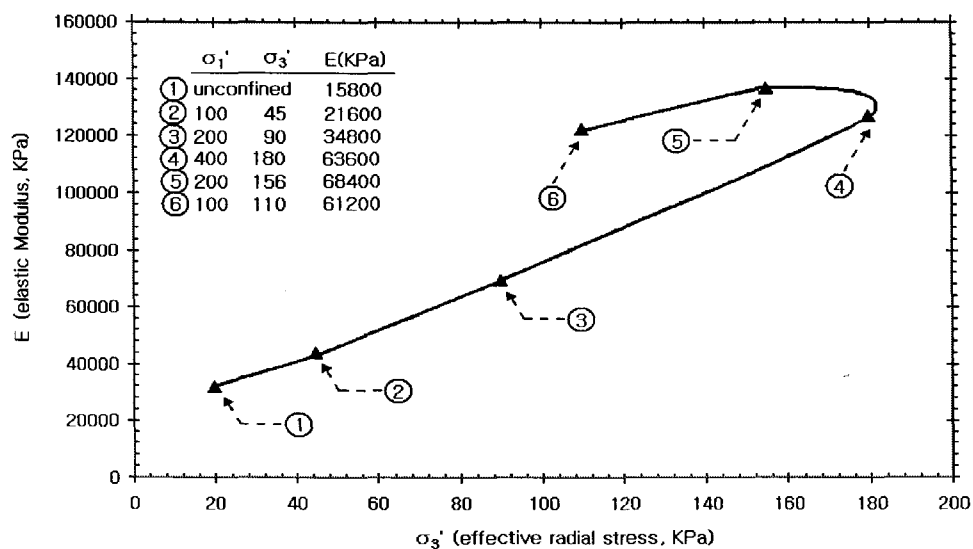


그림 10. 구속압별 탄성계수의 변화

탄성계수는 unconfined 상태에서는 15800KPa이며 구속압이 100KPa, 200KPa로 증가함에 따라 확연히 증가한다. 또한 OC상태가 되어 비록 연직방향 응력이 감소한 경우에도 탄성계수는 줄어들지 않았음을 볼 수 있다. OCR2인 경우에는 탄성계수가 증가했으며 OCR4인 경우에는 약간 감소하는 경향을 보이고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 삼축압축시험기를 이용해 서로 다른 응력으로 NC 및 OC상태로 비등방압밀시킨 군산지역 사질토를 비배수전단시험하여 응력이력이 사질토의 전단강도 및 탄성계수에 미치는 영향에 대하여 분석해보았다. 응력이력이 사질토의 전단강도 및 탄성계수에 미치는 영향을 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 같은 연직응력조건에서 사질토가 과압밀상태가 되면 정규압밀상태인 경우보다 큰 구속압을 갖게 되므로 이 영향으로 전단강도가 증가하게 된다. 동일한 연직응력을 최종 압밀응력으로 갖는 경우 OC상태의 시료가 NC상태의 시료보다 6~7% 더 큰 전단강도를 갖는다.

둘째, 탄성계수는 NC상태에서는 구속압의 증가에 따라 계속증가하는 경향을 보인다. 연직방향하중을 제하함으로써 과압밀상태로 시료를 조성해 전단시험하는 경우의 탄성계수는 OCR이 작은 경우 선행 압밀하중 단계에서의 탄성계수보다 큰 값을 보였으며 OCR이 커짐에 따라 탄성계수는 줄어드는 경향을 보였으나 이 값은 크지 않았다.

즉, 응력이력이 사질토의 비등방압밀 비배수전단 삼축시험시 전단강도에는 큰 영향을 미치지 않는 반면 탄성계수에는 큰 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.

참고 문헌

1. 김영수, 김대만(2004), "Aging 효과에 따른 모래의 비배수 정적전단거동 특성", 한국지반공학회논문집, 제 20권, 6호, pp.137~150.
2. 이병식, 박성국(2005), "다짐 화강풍화토의 응력이력에 따른 정지상태 토압계수의 변화", 한국지반공학회논문집, 제 21권, 8호, pp.85~93.
3. Been, K. and Jefferies, M. G. (1985), "A state parameter for sands", *Geotechnique*, Vol. 35, No. 2, pp.99-112.
4. Vaid, Y. P. and Chern, J. C. (1985), "Cyclic and monotonic undrained response of saturated sands," *Advances in the Art of Testing Soils Under Cyclic Conditions*, ASCE, pp. 120-147.