

다짐 화강풍화토의 응력이력에 따른 정지상태 토압계수의 변화

Variations of Coefficient of Earth Pressure at Rest According to Stress Paths for Compacted Residual Soils

이 병 식¹ Lee, Byung-Sik

박 성 국² Park, Sung-Kook

Abstract

Earth pressures acting on unmovable rigid walls vary according to loading-unloading conditions due to compaction experienced by backfill soil. Appropriate coefficients of earth pressure at rest with considering this influence need to be determined to estimate earth pressures more reasonably. In this study, a single cycle hysteretic model simulating soil's loading-unloading-reloading behavior under K_0 -condition was reproduced by conducting a series of K_0 -triaxial test for compacted residual soils. Based on the results, coefficients of earth pressure at rest at each stage of stress paths such as, virgin loading, unloading and reloading were determined. Also, applicabilities of empirical equations to the estimation of the coefficients were evaluated by comparing the experimental results with those estimated by the equations. As a result, it was concluded that the empirical equations could be applied reasonably to the estimation of the coefficients for compacted residual soils in cases where some amount of error might be acceptable for the reloading stage of the hysteretic model.

요 지

벽체 변위가 제한되는 옹벽 구조물에 작용하는 토압은 시공 중 뒷채움토에 작용하는 다짐응력의 영향에 따라 변화한다. 정지토압을 보다 적절하게 추정하기 위해서는 이러한 영향을 고려하여 정지토압계수를 산정하여야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 다짐 화강풍화토에 대해서 정지토압상태에서 흙이 받는 응력의 재하, 제하, 재 재하 단계를 모사하는 응력이력모델을 단주기 K_0 -삼축시험으로 재현하였다. 실험결과로부터 각 하중단계의 응력이력조건에 대한 정지상태토압을 결정하였다. 이들 값을 경험식으로부터 얻은 값과 비교하여 다짐 화강풍화토에 대한 정지토압계수 결정을 위한 경험식의 적용성을 평가하였다. 결과적으로 다짐 화강풍화토에 대한 경험식의 적용성은 재 재하 경로에 대해서 오차 감안이 가능한 경우에 대체적으로 적절한 것으로 평가되었다.

Keywords : Coefficient of earth pressure at rest, Compaction induced earth pressure, Soil compaction hysteretic model

1. 서 론

다짐에 의해 인위적으로 만들어지는 댐이나 도로체, 고정벽체의 뒷채움 지반 내 혹은 인접한 구조물에 작용하는 수평토압은 측면변위가 구속되는 상태에서 발생하므로 정지토압으로 고려할 수 있다. 정지토압

을 구하기 위해서는 적절한 정지토압계수의 추정이 필수적이다. 정지토압계수는 다짐 시 흙이 받은 응력이력에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Broms 1971; Seed와 Duncan 1981; 정성교 1989). 따라서 측면 변위가 구속되는 조건에서 조성되는 흙 구조물에 대한 합리적인 설계와 시공을 위해서는 다짐 시 흙이 받은

1 정희원, 공주대학교 공과대학 토목환경공학과, 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Kongju National Univ., blee@kongju.ac.kr)

2 정희원, (주)오주엔지니어링, 터널부, 대리 (Member, Assistant Manager, Tunnels and Underground Dept., Oju Engrg. Co., Ltd.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다. 단, 건전한 토의 문화 정착을 위하여 학회에서 내용을 조정할 수 있음을 알려드립니다.

응력이력을 고려하여 추정된 적절한 정지토압계수를 적용하는 것이 중요하다.

이러한 배경에서 본 논문에서는 화강풍화토에 대해서 현장의 다짐진행 과정을 고려한 단주기 응력이력 삼축실험을 수행하였다. 실험결과로부터 응력이력에 따른 정지상태 토압계수의 변화를 분석하였으며, 정지토압계수를 결정하기 위해 제안된 기존 경험식들의 화강풍화토에 대한 적용성을 평가하였다.

2. 단주기 응력이력 모델과 경험식

반복다짐되는 뒷채움토 내에 발생하는 응력상태변화는 그림 1에 보인 바와 같은 단주기 응력이력 모델로 개략화할 수 있다. 본 논문에서는 일련의 K_o -삼축실험을 수행하여 다짐 화강풍화토에 대해서 이러한 단주기 응력이력 모델을 실험실에서 재현하였다.

그림 1에 보인 처녀 재하, 제하와 재재하 등의 응력이력 각 단계에서 정지상태토압계수를 흙의 전단강도(내부마찰각)로부터 추정하기 위한 많은 연구들이 수행되어 왔다. 본 논문에서는 이들 중 화강풍화토에 대한 적용성이 높을 것으로 기대되는 Jaky(1944), Mayne과 Kulhawy(1982), 정성교(1989) 등이 제안한 경험식을 선택하여 평가해 보고자 한다. 이들 경험식에서는 각 하중 단계에 대한 정지상태토압계수를 K_{onc} (처녀재하), K_{ou} (제하), K_o (재 재하) 등의 기호로 표기하였다. 여기서 K_o 은 일반적으로 재 재하 시 응력경로의 기울기인 재 재하계수(m_r)를 사용하여 정의하였다.

처녀재하 시의 정지토압계수(K_{onc})에 대해서는 식 (1)과 같이 주어지는 Jaky(1944)의 경험식을 평가하였다.

$$K_{onc} \approx 1 - \sin\phi' \quad (1)$$

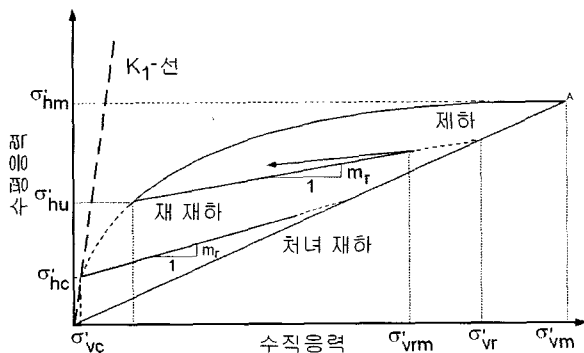


그림 1. 뒷채움토의 단주기 응력이력 모델

제하 시의 정지토압계수(K_{ou})에 대해서는 Mayne과 Kulhawy(1982)가 제안한 식 (2)의 경험식을 평가하였다.

$$K_{ou} = (1 - \sin\phi') OCR^{\sin\phi'} \quad (2)$$

재재하 시 응력경로의 기울기, m_r 의 추정을 위해서는 Mayne과 Kulhawy(1982)의 경험식을 근간으로 정성교(1989)이 제안한 경험식인 식 (3)의 적용성을 평가해 보 고자 한다.

$$m_r = K_o \frac{3}{4} \frac{\sigma'_{hm} - \sigma'_{hu}}{\sigma'_{hm} - \sigma'_{hc}} \quad (3)$$

위 식에서 σ'_{hm} 과 σ'_{hu} 는 그림 1에 보인 바와 같이 각 시료에 가한 최대수평응력과 재재하가 시작되는 점에서의 수평응력을 의미한다. σ'_{hc} 는 그림 1에서 보인 바와 같이 흙의 응력상태가 정지토압에서 파괴상태로 전이되는 점, 즉 응력이력곡선이 K_1 -선에 접할 때 가해진 수평응력이다. 여기서 K_{ou} 값의 극한치인 K_1 은 일반적으로 식 (4)로 정의되는 수동토압계수와 거의 같은 것으로 가정된다.

$$K_1 = K_p = \frac{1 + \sin\phi'}{1 - \sin\phi'} \quad (4)$$

한편 $K_{ou} = K_p$ 인 조건에서 정지상태에서의 과압밀비를 한계과압밀비, OCR_{lim} ,로 정의하고 다음 식과 같이 표현 하였다.

$$OCR_{lim} = \left[\frac{1 + \sin\phi'}{(1 - \sin\phi')^2} \right]^{\frac{1}{\sin\phi'}} \quad (5)$$

3. 실험 계획 및 방법

본 논문에서 수행한 일련의 실험들의 개요를 표 1에 요약하였다.

본 실험에 사용된 풍화토의 물리적 특성을 표 2에 정리하였으며, 시료의 입도분포를 그림 2에 보였다.

시료의 성형방법은 흙의 거동에 많은 영향을 준다. 일반적으로 성형 시 성형된 시료의 균질성을 확보하고 입도분리 현상을 최소화하는 것이 중요하다. 본 실험에서는 복층습윤다짐법을 사용하여 시료를 성형하였다. #10 체에 거른 흙을 함수비를 조절하여 입도분포가 고르게 되도록 잘 섞고, 시료성형몰드에 부어 넣은 후 스프링 다짐봉을 사용하여 층별로 반죽다짐 하였다. 원하는 임의의 건조밀도를 얻기 위해서 시행착오로 적절한 층별

다짐횡수를 결정하여 적용하였다. 성형된 시료의 대표 직경과 높이는 각각 33mm와 72mm이다.

성형한 시료를 포화시키기 위해서 본 실험에서는 진공법과 배압법을 병행하여 사용하였다. 먼저 진공법을 이용 시료속의 공기를 진공펌프를 사용하여 강제 흡입하였다. 이때 시료 하단부에 과도한 불균등 진공압이 가해지지 않도록 하기 위해서 시료로부터 공기가 나오지 않을 때까지 진공압을 가한 후 1시간의 정지시간을 주는 과정을 2차례 반복 수행하였다. 배압 시에는 시료의 유효응력을 10kPa에 고정하고 2시간당 20kPa의 배압을 가하여 시료를 포화시켰다. 단계별로 간극수압계수 B 값을 측정하고, B 값이 0.98 이상인 경우 시료가 포화된 것으로 간주하였다.

K_0 -삼축실험에서 적절한 재하율과 제하율은 시행착오적 방법으로 결정하였으며, 재하율은 200kPa/hr로, 제하율은 25kPa/hr로 조절하였다.

표 1. 실험 계획 개요

연번	방법	시료	목적
1	K_0 -삼축실험 처녀재하	• 건조밀도 변화	• 처녀재하 시 K_0 값 추정, • 처녀재하 응력이력을 재현하는 적절한 건조밀도 범위 결정
2	CIU 전단실험	• 건조밀도 변화	• 건조밀도 변화에 따른 토압계수와 전단강도(ϕ')의 관계 조사 • 경험식 (1)의 적용성 평가
3	K_0 -삼축실험 단주기 응력이력	• 처녀재하 응력경로가 재현되는 건조밀도의 시료	• 처녀재하 시의 최대 압밀하중 변화 • 제하 시의 K_{ov} 값 변화 조사 • 경험식 (2)의 적용성 평가
4	K_0 -삼축실험 단주기 응력이력	• 처녀재하 응력경로가 재현되는 건조밀도의 시료	• 제하 압밀비 변화 • 재재하 시 응력경로의 기울기인 m 값 변화 조사 • 경험식 (3)의 적용성 평가

표 2. 화강풍화토의 물리적 특성

w_n (%)	G_s	아터버그 한계 (%)		투수계수 (cm/sec)	USCS
		LL (%)	PI (%)		
16.8	2.68	27	10	7.3×10^{-7}	SC

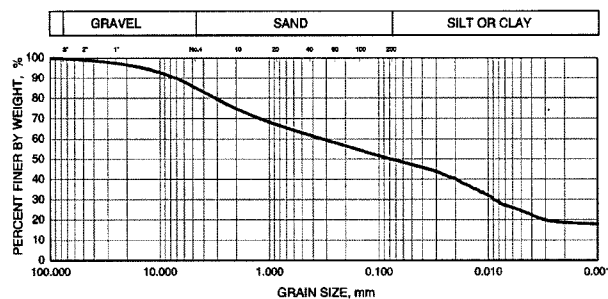


그림 2. 화강풍화토의 입도분포곡선

4. 실험결과 및 분석

4.1 K_0 -삼축실험

시료의 건조밀도 변화에 따른 정지토압계수의 변화를 분석하기 위해서 서로 다른 건조밀도를 가지는 20개의 시료에 대한 K_0 -삼축실험을 수행하였다(표 1의 실험 연번 1). 이들 시료의 건조밀도는 $1.48\text{g/cm}^3 \sim 1.97\text{g/cm}^3$ 범위에 있다. 일련의 실험에서 구한 결과 중 대표적인 7가지 결과만을 그림 3으로부터 그림 9에 각각 보였다. 각 그림에 실험결과로부터 구한 K_{onc} 값을 함께 나타냈다.

그림 3으로부터 그림 9에 보인 K_0 -삼축실험 결과와 다른 13개의 시료에 대해 얻은 결과를 종합하여 건조밀도 변화에 따른 K_{onc} 값의 변화를 그림 10에 나타냈다.

그림 10의 결과를 보면 측정된 K_{onc} 는 건조밀도가 1.80g/cm^3 이하인 시료에 대해서는 0.41~0.46 범위의 값을 가지고 비교적 작은 범위의 편차 내에서 변화함을 알 수 있다. 그러나 측정된 K_{onc} 는 건조밀도가 1.80g/cm^3 보다 큰 시료에 대해서는 건조밀도가 증가할수록 점차로 감소하는 값을 가짐을 알 수 있다. 또한 이들 시료에 대해서는 그림 7로부터 그림 9의 결과를 보면 K_{onc} 재하

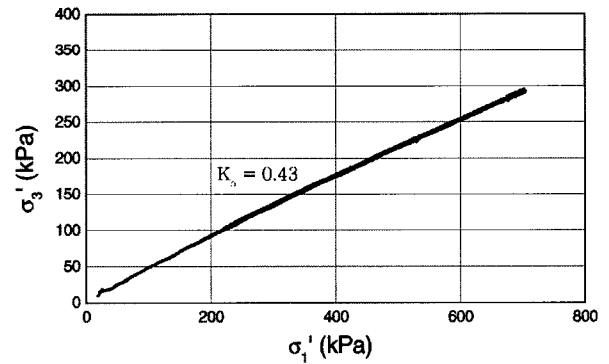


그림 3. K_0 -삼축실험 결과($\rho_d=1.48\text{g/cm}^3$)

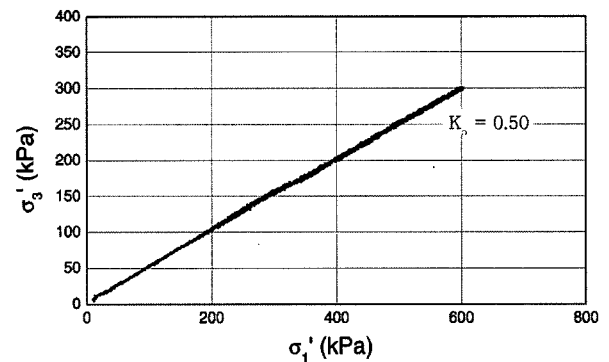


그림 4. K_0 -삼축실험($\rho_d=1.60\text{g/cm}^3$)

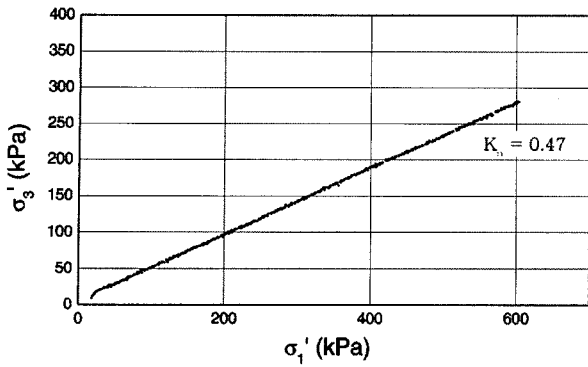


그림 5. K_0 -삼축실험($\rho_d=1.65\text{g/cm}^3$)

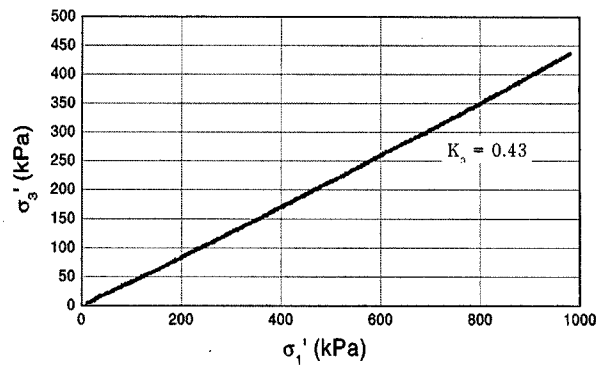


그림 6. K_0 -삼축실험($\rho_d=1.75\text{g/cm}^3$)

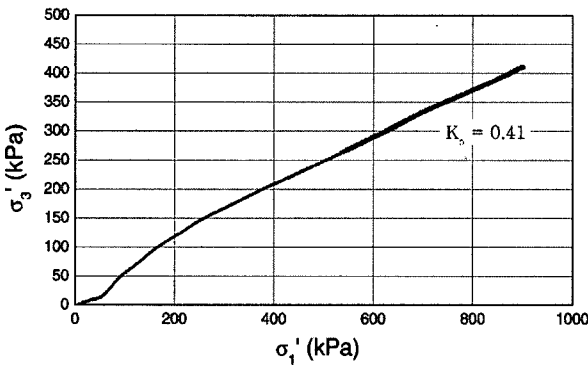


그림 7. K_0 -삼축실험($\rho_d=1.80\text{g/cm}^3$)

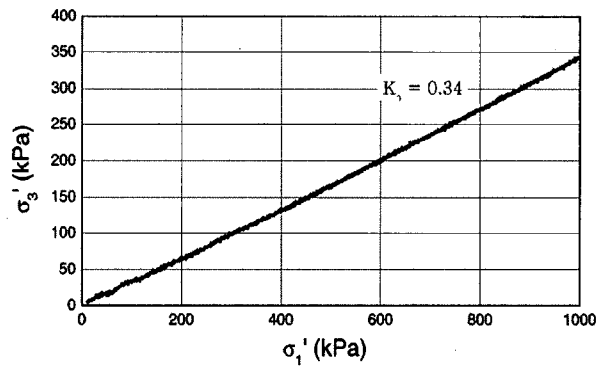


그림 8. K_0 -삼축실험($\rho_d=1.86\text{g/cm}^3$)

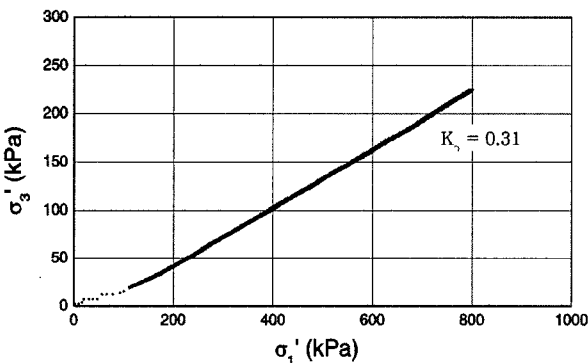


그림 9. K_0 -삼축실험($\rho_d=1.96\text{g/cm}^3$)

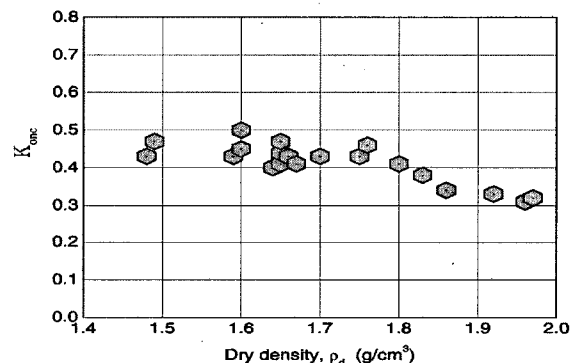


그림 10. 건조밀도 변화에 따른 K_{0nc} 값의 변화

곡선의 직선구간이 원점을 지나지 않는 사실에 주목할 필요가 있다.

위의 실험결과들에 근거하여 다음과 같은 결론을 추론할 수 있었다.

- 1) 시료의 건조밀도가 1.80g/cm^3 이하로 비교적 작은 경우 시료의 응력상태가 다짐에 의한 재하 및 제하 단계를 반영하지 않는다. 따라서 K_0 -삼축실험 결과에서 얻은 K_{0nc} 값은 처녀재하 응력조건에 해당하는 값이다.
- 2) 시료의 건조밀도가 1.80g/cm^3 이상으로 큰 경우 K_0 -

삼축실험이 시행되기 이전에 시료의 응력상태는 재하 및 제하의 단계를 경험한 것으로 볼 수 있을 것이다. 따라서 시료의 응력상태는 그림 1에 보인 응력에서 재하 단계에 해당하는 응력이력선 상에 있을 가능성이 있다. 또한 이 사실은 그림 7~그림 9의 결과에서 직선구간이 원점을 지나지 않는 사실로도 보완 설명된다. 결과적으로 이 때 구해진 정지상태 토압계수 값은 응력이력곡선의 상향 이동을 고려하지 않고 구한 값이므로 의미가 없는 값으로 추정된다.

4.2 처녀재하 시의 K_0 경험식

다짐 화강풍화토에 대해 처녀재하 시의 정지토압계수(K_{onc})를 추정함에 있어서 식 (1)에 보인 Jaky(1944)의 경험식을 적용하여 평가하고자 한다.

위 목적을 위해서 시료의 건조밀도를 $1.48\text{g/cm}^3 \sim 1.95\text{g/cm}^3$ 범위에서 변화시킨 17개의 시료에 대한 압밀 비배수(CIU) 전단실험을 수행하고 다짐토의 전단강도 정수를 구했다. 표 3에 각 시료에 대해 구한 내부마찰각과 식 (1)을 사용하여 구한 K_{onc} 값을 정리하였다. 표 3에 보인 실험결과 중 그림번호가 표시된 5가지 대표적인 시료들에 대한 전단실험결과를 그림 11~그림 15에 각각 나타냈다.

표 3과 그림 11로부터 그림 15의 결과를 보면 건조밀도가 1.75g/cm^3 보다 작은 경우에 점착력은 건조밀도가 증가함에 따라 약간 증가하지만 유효응력에 대한 내부마찰각은 평균적으로 35° 내외로 거의 일정한 결과를 보임을 알 수 있다. 그러나 건조밀도가 1.75g/cm^3 보다 상당히 커지면 내부마찰각도 증가하여 건조밀도가 1.95g/cm^3 인 경우(그림 15)에 38° 이상으로 증가하는 경향을 보인다.

표 3. 식 (1)을 이용하여 내부마찰각으로부터 추정된 정지상태토압계수

연번	$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	$\phi' (^{\circ})$	K_{onc}	그림번호
1	1.48	35.4	0.42	그림 11
2	1.49	32.0	0.47	
3	1.59	34.8	0.43	
4	1.60	33.4	0.45	
5	1.60	35.4	0.42	그림 12
6	1.65	32.7	0.46	
7	1.65	36.2	0.41	
8	1.65	34.8	0.43	
9	1.65	36.2	0.41	
10	1.65	34.1	0.44	
11	1.64	36.9	0.40	
12	1.66	34.8	0.43	
13	1.67	36.2	0.41	
14	1.70	34.8	0.43	
15	1.75	35.4	0.42	그림 13
16	1.80	37.1	0.40	그림 14
17	1.95	38.6	0.38	그림 15

건조밀도가 1.75g/cm^3 보다 작은 경우의 시료들이 전반적으로 유사한 35° 내외의 내부마찰각을 갖는 결과를 얻은 이유는 이들 시료 내에 다짐에 의한 잔류응력이

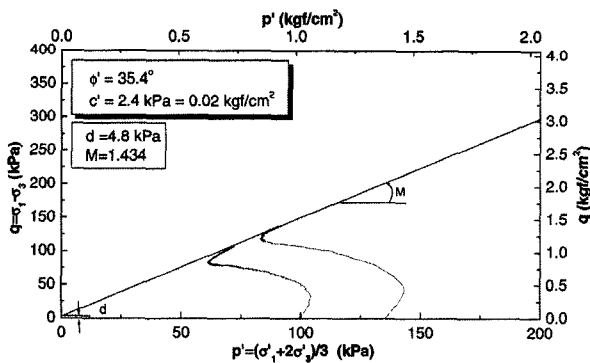


그림 11. CIU 전단실험 결과 ($\rho_d=1.48\text{g/cm}^3$ 인 경우)

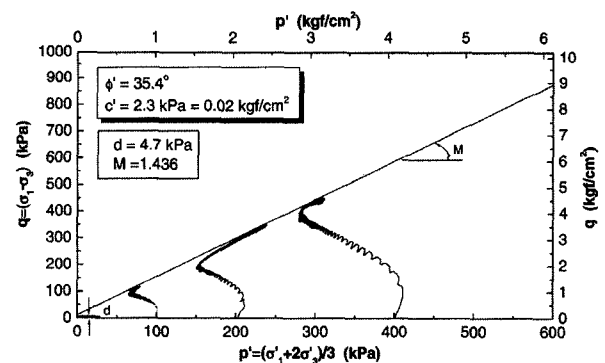


그림 12. CIU 전단실험 결과 ($\rho_d=1.60\text{g/cm}^3$ 인 경우)

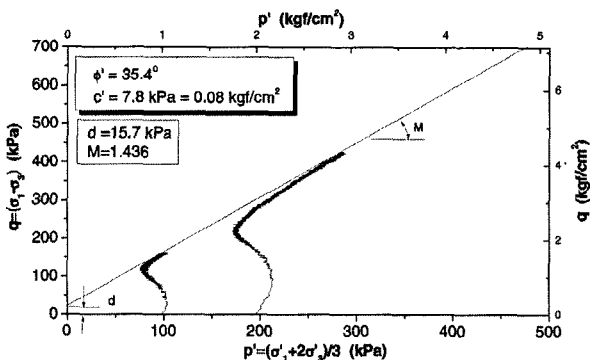


그림 13. CIU 전단실험 결과 ($\rho_d=1.75\text{g/cm}^3$ 인 경우)

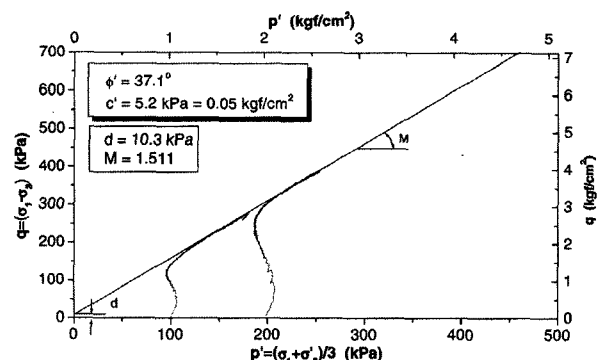


그림 14. CIU 전단실험 결과 ($\rho_d=1.80\text{g/cm}^3$ 인 경우)

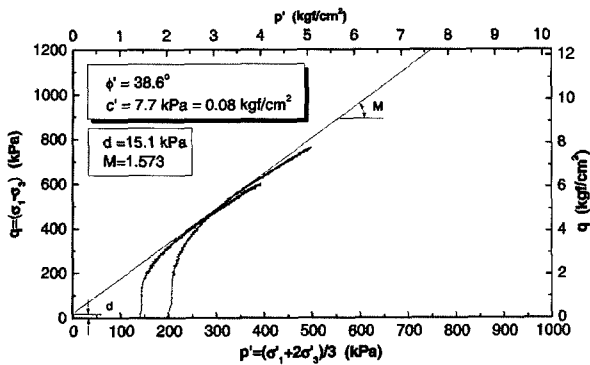


그림 15. CIU 전단실험 결과 ($\rho_d=1.95\text{g/cm}^3$ 인 경우)

작아 최소구속응력인 100kPa 이상에서 정규압밀토와 같이 거동하기 때문에 추정된다. 이러한 사실은 그림 11로부터 그림 13의 결과에서 알 수 있듯이 전단에 의해 시료 내에 양의 간극수압이 발생하는 현상으로 부가 설명될 수 있다.

반면에 건조밀도가 1.75g/cm^3 보다 큰 경우의 시료는 그림 14와 그림 15의 결과에서 볼 수 있듯이 전단 시 과압밀토로 거동하며 결과적으로 건조밀도가 증가할수록 전단강도도 증가하고 있는 것이다.

한편 표 3에 보인 바와 같이 시료의 건조밀도 변화에 대해서 식 (1)을 이용하여 구한 K_{onc} 값의 변화를 분석하여 경험식의 적용성을 판단하고자 한다. 표 3의 결과를 보면 시료의 건조밀도가 1.75g/cm^3 보다 작은 경우에는 K_{onc} 값이 평균적으로 0.42로 구해지고, 1.75g/cm^3 보다 큰 경우에는 0.40 이하로 감소하는 경향을 보인다. 이러한 추세는 물론 위에서 설명한 내부마찰각의 감소를 반영하고 있으며, 특히 주목해야 할 사실은 이러한 결과는 그림 10에 보인 K_o -삼축실험 결과와 잘 일치하고 있다는 점이다.

이러한 결과로부터 추론할 수 있는 사실은 처녀재하 시의 정지토압계수를 구하기 위해서 Jaky의 경험식인 식 (1)을 적용하는 경우 주의를 요한다는 점이다. 시료의 건조밀도가 비교적 작아(본 연구의 경우에 1.75g/cm^3 이하) 응력이력이 처녀재하 상태가 되는 경우에 식 (1)을 이용하여 적절한 K_{onc} 값을 얻을 수 있다. 그러나 건조밀도가 상대적으로 큰 경우에 대해서는 식 (1)로 얻은 값을 위에서 설명한 바와 같이 처녀재하상태에 대한 K_{onc} 값으로 볼 수 없다. 이러한 사실은 과압밀토인 경우에 식 (1)로 얻은 값은 실제 토압을 과소평가하게 되므로 보정식을 적용하여야 한다는 사실과 관계가 있다.

한편 박(2002)은 K_o -비등방압밀비배수(CAU) 전단실

험으로부터 얻은 내부마찰각을 식 (1)에 적용하여 구한 K_{onc} 값의 타당성을 검토한 바 있다. 실험결과 처녀 재하 응력이력 상태로 간주할 수 있는 건조밀도를 가지는 시료들에 대해서 대체적으로 37° 전후의 내부마찰각을 얻었으며, 이를 경험식에 대입하여 K_{onc} 가 0.40 전후의 값을 가지는 결과를 얻었다. 이 결과를 K_o -삼축실험으로부터 얻은 K_{onc} 값과 비교하면 다소 낮은 값으로 판단된다. 결과적으로 처녀재하단계에 대한 K_{onc} 값을 추정하기 위하여 식 (1)을 사용하는 경우에 CIU 전단실험으로부터 구한 내부마찰각을 적용하는 것이 보다 타당할 것이라는 결과를 얻었다.

4.3 제하 및 재재하 정지토압계수

제하 및 재재하 단계(그림 1)에서의 정지토압계수를 결정하기 위한 일련의 단주기 응력이력 K_o -삼축실험을 수행하였다. 일련의 실험은 편의상 2가지 실험군으로 구분하기로 한다.

첫 번째 실험군(표 1에서 실험연번 3)에서는 K_o -상태에서 처녀재하 수평응력을 각각 300kPa, 600kPa, 1000kPa 까지 증가시킨 후 제하하여 과압밀비를 변화시키는 단주기 응력이력 K_o -삼축압축실험을 수행하였으며, 실험 결과를 그림 16에 보였다. 이 때 시료들은 4.1절에서 조사된 바와 같이 처녀재하 시의 K_{onc} 값을 구하기에 적절한 다짐도인 것으로 추정되는 건조밀도 1.65g/cm^3 로 성형하였다.

그림 16의 실험결과로부터 과압밀비의 변화에 따른 제하 시의 정지토압계수, K_{ou} ,의 변화를 분석해 보고자 한다. 또한 식 (2)에 보인 K_{ou} 를 추정하는 경험식의 적용성을 평가해 보고자 한다.

실험에 사용된 시료의 내부마찰각이 앞서 4.2에서 구한 값인 35.4° 를 갖는 것으로 가정하고 식 (4)을 이용하여 K_p -선을 구해 그림 16에 나타냈다. 또한 각 최대수평응력에 대해서 한계과압밀비에 해당하는 응력상태를 식 (5)를 이용하여 구해 같은 그림에 나타냈다(점 a, b, c). 한편 식 (2)를 이용하여 구한 제하곡선들을 같은 그림에 보였다.

또한 그림 16에 보인 응력곡선의 실험결과를 이용하여 과압밀비에 따른 제하 시 정지상태토압계수, K_{ou} ,를 구해 그림 17에 보였다. 각 과압밀비에 대해 식 (2)로 주어지는 경험식을 이용하여 구한 K_{ou} 값을 같은 그림에 나타냈다.

그림 16과 그림 17의 결과에서 다음의 사실들을 추론할 수 있었다.

- 1) 실험에서 시료의 응력상태가 K_p -선을 따르는 응력경로를 찾을 수 없었다. 이는 낮은 응력상태에서 실험의 정밀도가 낮았기 때문으로 판단된다(그림 16).
- 2) 그림 16에서 과압밀비가 클수록 처녀재하하중이 작을 경우에 경험식 (2)에 의해 구한 제하곡선과 실험치의 편차가 크다. 이 사실은 그림 17의 결과에서도 확실하게 구분되어 표현된다. 따라서 그림 16에서 보는 바와 같이 한계과압밀비와 그 조건에서의 수평응력이 실험에 의한 값보다 상당히 낮은 편으로 나타났다.
- 3) 처녀제하 시의 토압계수(K_{ov})는 처녀재하 시에 가해진 최대수평응력에 영향을 받을 수 있는 것으로 나타났다(그림 17).
- 4) 최대수평응력이 600kPa 이상, 과압밀비가 6 미만인 조건에서 실험치와 경험식으로부터 구한 값의 일치성이 좋은 경향을 보인다.

두 번째 실험군(표 1에서 실험연번 4)은 제하 시의 토압계수(K_{ov})와 더불어서 재재하 시의 정지토압계수(K_{or}) 결정을 위한 재재하 시 응력경로의 기술기, m_r 의 조사를 목적으로 수행되었다. 이 실험군은 각각 K_0 상태에서 처녀재하 수평응력을 600kPa까지 가한 후 5kPa, 100kPa, 200kPa까지 제하하고, 다시 재하 하는 일련의 단주기 응력이력 K_0 -삼축실험들로 구성된다. 시료들은 건조밀도 $1.65g/cm^3$ 로 성형하였으며, 최대 수평응력의 크기 600kPa은 위의 첫 번째 실험군의 결과를 근거로 결정되었다.

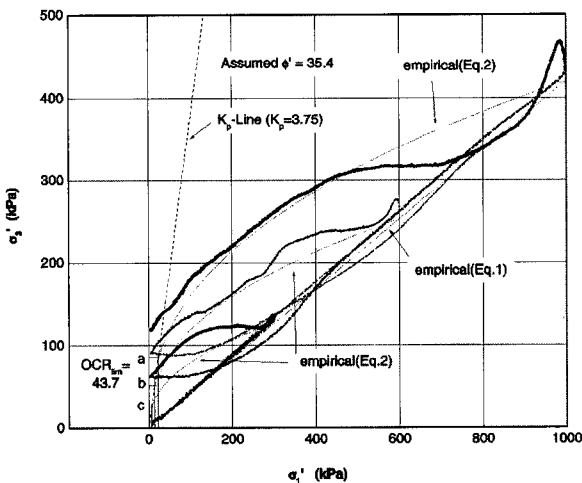


그림 16. 단주기 응력이력 K_0 -삼축실험(실험군 1) 결과

두 번째 실험군 중 5kPa까지 제하 후 재재하한 실험 결과를 그림 18에 보였다. 같은 그림에 내부마찰각을 35.4° 로 가정하고 식 (1)과 식 (2)를 적용하여 구한 처녀재하 및 제하응력경로를 함께 나타냈다. 같은 그림에 K_p -선을 그리고, OCR_{lim} 에 해당하는 응력상태를 식 (5)로 구한 a점($\sigma'_{vc}=13.7kPa$, $\sigma'_{hc}= 51.5kPa$)을 나타냈다.

실험결과로부터 m_r 값을 결정하기 위한 재 재하 응력 경로는 앞서 그림 1에 보인 바와 같이 그림 18의 결과에 대해서도 직선으로 가정하고 직선 a~b로 가정하였다(그림 18). 여기서 재 재하 응력경로의 시점을 점 a로 가정한 이유는 앞서 실험군 1의 결과에서 알 수 있었던 바와 같이 과압밀비가 큰 구간에서 제하 응력경로에 대한 실험결과의 정밀도가 낮음에 근거하였다. 점 a 이후의 직선구간은 실험 재 재하 응력경로에서 경로가 직선으로 나타나는 구간을 선정하여 점 b까지 연결하였다. 결과적으로 그림 18에서 점 b의 응력상태는 $\sigma'_{vc}=151kPa$, $\sigma'_{hc}= 331kPa$ 이므로 점 a와 b의 응력상태결과로부터

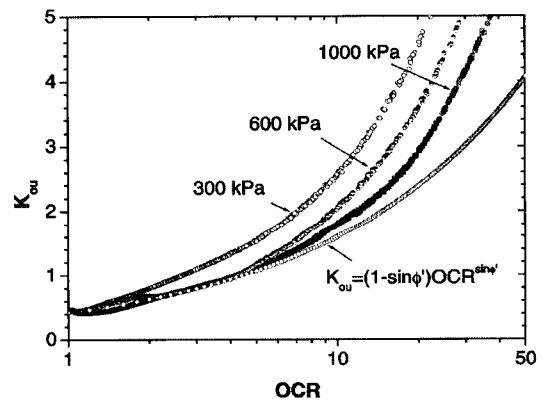


그림 17. 최대수평압밀하중 조건별 과압밀비의 변화에 따른 제하 시 정지토압계수 분포 및 경험식을 이용한 결과와의 비교

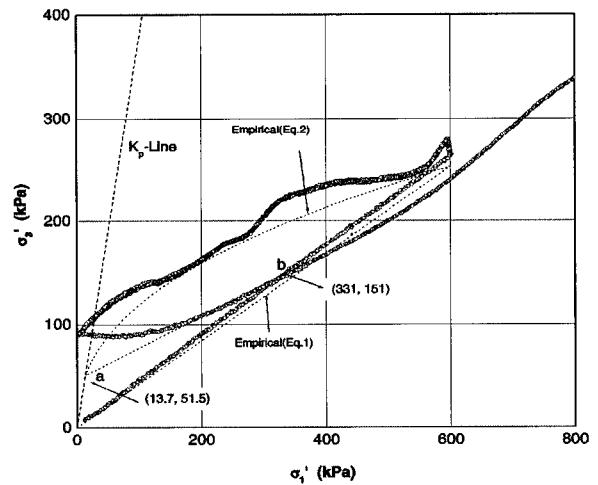


그림 18. 단주기 응력이력 K_0 -삼축실험($\sigma'_{vc}=5kPa$)

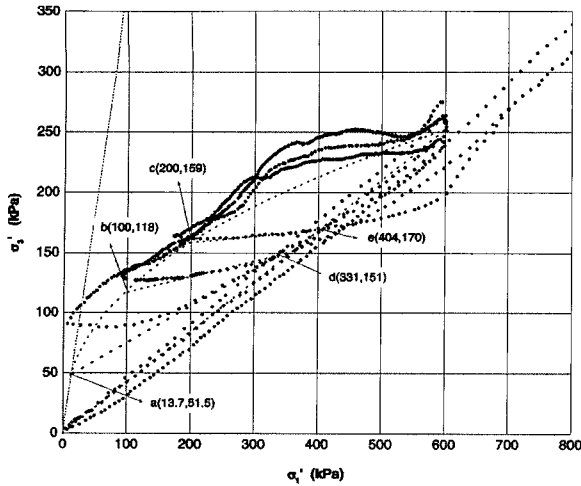


그림 19. 단주기 응력이력 K_0 -삼축실험(실험군 2) 결과

재 재하 곡선의 기울기, m_r 값을 0.31로 구할 수 있었다. 이 결과는 식 (3)의 원형인 $m_r = \frac{3}{4} K_0$ (Mayne과 Kulhawy, 1982) 관계에 4.1에서 구한 처녀 재하 시의 정지상태 토압계수 0.41을 적용하여 구한 값($3/4 \times 0.41 = 0.31$)과 잘 일치하였다.

제하응력의 크기에 따른 m_r 값의 변화추이를 조사하기 위해서 그림 18에 보인 결과와 더불어서 다른 제하하중에 대해서 구한 실험결과를 그림 19에 함께 나타냈다. 그림 18의 결과분석에서 적용한 바와 같은 방법으로 각 최소 제하응력의 경우에 대해서 각각 재 재하 직선응력 경로를 결정하여 같은 그림에 보였다. 각 직선구간의 시점과 종점은 최소 제하응력 5kPa, 100kPa, 200kPa의 경우에 대해서 각각 직선 a~d, 직선 b~d, 직선 c~e로 정하고, 점 a로부터 e까지 각 점의 응력상태를 그림에 나타낸 바와 같이 구했다(그림 19).

그림 19의 결과에서 제하하중이 5kPa인 경우 제하곡선의 기울기는 앞서 그림 18의 결과에서 구한 바와 같이 0.31이다. 그림 19에 보인 각 점의 응력상태를 적용하여 제하하중이 100kPa, 200kPa인 경우들에 대한 m_r 값을 추정하여 보면 각 경우에 대해서 0.14와 0.05를 얻는다.

한편 경험식 (3)을 이용하여 제하하중이 100kPa, 200kPa인 경우들에 대한 m_r 값을 구한 결과 각각 0.21, 0.14을 얻었다. 이 값들을 실험으로부터 구한 값들(0.14과 0.05)과 비교하면 결과 간에 약간의 오차가 있을 수 있음을 알 수 있었다. 이 차이는 재 재하가 시작되는 응력상태에 대해서 과압밀비가 작아질수록 심해지는 추세를 보였고, 실험결과에 의한 값보다 경험식에 의한 값이 크게 나타났다. 또한 실험결과는 제하하중의 크기 변화에 따

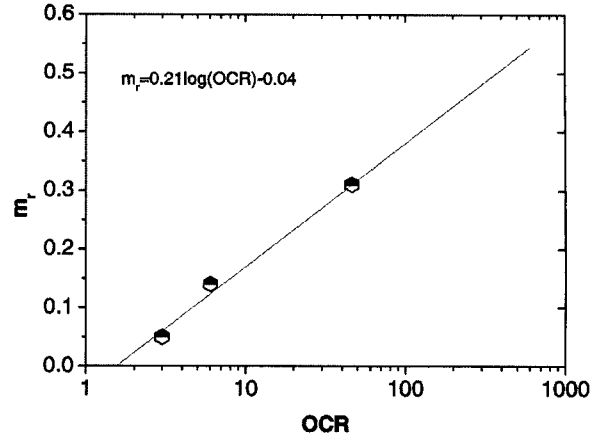


그림 20. 실험으로 구한 m_r 값과 최소제하응력으로 계산한 OCR과의 관계

른 m_r 의 관계가 식 (3)에서 주어진 바와 같은 선형의 관계로 변화하지 않는 특성을 가지는 것으로 추정되었다.

따라서 정(1989)이 지정한 바와 같이 Ou(1988)가 제안한 관계식을 근간으로 실험으로부터 구한 m_r 값과 최소 제하응력에 대해서 계산한 과압밀비 간의 관계를 그림 20과 같이 나타내 보았다. 그림 20에 보인 결과를 보면 이들 두 값의 관계는 개략적으로 다음 식 (6)의 관계로 관련지어 나타낼 수 있었다.

$$m_r = 0.21 \cdot \log(\text{OCR}) - 0.04 \quad (6)$$

5. 결론

다짐 화강풍화토에 대해서 본 논문에서 수행한 일련의 실험결과에 근거하여 응력이력에 따른 정지토압계수 결정을 위한 기존 경험식들의 적용성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 시료의 건조밀도 약 1.80g/cm^3 을 기준으로 이 값보다 작은 경우에는 K_0 -삼축실험에서 처녀 재하응력이력이 재현되었으며, 처녀재하 시의 정지상태토압계수(K_{onc})를 구하기 위한 경험식 (1)의 적용성도 양호한 것으로 나타났다. 건조밀도가 상대적으로 큰 경우는 시료가 재하 및 제하 단계를 거친 재재하 응력이력을 보이는 것으로 판단되었다. 따라서 K_{onc} 를 구하는 K_0 -삼축실험을 위한 시료 성형 시에 시료의 건조밀도를 과다하게 커지지 않도록 조절하여야 할 필요가 있다.
- (2) 제하 응력이력 상태에 대한 실험결과 과압밀비가 약

6 이상인 경우에 실험치와 경험식 (2)로부터 구한 지하 시의 정지상태토압계수(K_{ou}) 간의 차이가 커졌다. 그러나 과압밀비가 큰 구간에 대한 실험결과와 낮은 신뢰도를 고려하여 경험식의 적용이 가능한 것으로 판단하였다.

(3) 재재하 응력이력에 대한 m_r 값의 결정에 있어서 경험식 (3)을 적용하는 경우에 약간의 오차 가능성을 볼 수 있었다. 그러나 본 실험에서 구한 식 (6)의 결과도 흙의 다양성, 실험횟수의 부족 등으로 실무에 적용하기에는 어려운 것으로 판단되었다. 따라서 과압밀비에 따라 변하는 m_r 값 결정에 신뢰도를 부여하기 위해서는 다양한 흙에 대해서 충분한 실험을 수행하여 식 (6) 형태의 관계식을 얻기 위한 연구의 수행이 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 박성국 (2003), *다짐풍화토의 횡방향 토압에 대한 실험연구*, 석사학위 논문, 공주대학교.
2. 정성교 (1989), *빚채움 다짐에 의한 토압*, 박사학위 논문, 서울대학교.
3. Broms, B. (1971), "Lateral Earth Pressures Due to Compaction of Cohesionless Soils", *Proc. 4th European Conf. on Soil Mech.*, Budapest, pp.373-384.
4. Jaky, J. (1944), "The Coefficient of Earth Pressure at Rest", *Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers*, Vol.7, pp.355-358.
5. Mayne, P. W. and Kulhawy, F. H. (1982), "K_o-OCR Relationships in soil", *Journal of Geotechnical Eng. Div.*, ASCE, Vol.108, GT 6, pp.851-872.
6. Ou, Chang-Yu (1988), *Finite Element Analysis of Compaction-Induced Stresses and Deformation*, Ph. D. Thesis, Stanford Univ.
7. Seed, R. B. and Duncan, J. M. (1983), *Soil-Structure Interaction Effects of Compaction-Induced Stresses and Deflections*, Geotechnical Engineering Research Report No.UCB/GT/83-06, Univ. of California, Berkeley, CA.

(접수일자 2005. 7. 6, 심사완료일 2005. 10. 24)