

일정구속압력 다단계삼축압축시험

Multi-Stage Triaxial Test under Constant Confining Pressure

김 상 규*¹
Kim, Sang-Koo
김 현 태*²
Kim, Hyun-Tae
김 호 일*³
Kim, Ho-Il

Abstract

This paper proposes a new procedure carrying out a series of consolidated-undrained triaxial tests with a specimen. In this procedure high confining pressure applied to the specimen keeps constant during the test and each stage of consolidation can be controlled by partial drainage. With this procedure the test time is remarkably reduced by performing a series of triaxial tests with a single specimen. In order to verify the applicability of the procedure, standard triaxial compression tests and conventional multi-stage triaxial tests are performed for both undisturbed and disturbed samples and the results are compared with those of the proposed procedure. The comparison shows that strength parameters determined by the proposed procedure are well agreed with those of the other tests and thus it can be said that the procedure is very effective and practical in determining strength parameters.

요 지

한 개의 공시체에 대해 일정한 크기의 높은 구속압력을 가하고, 단계별로 압밀배수시간을 조정하여 압밀배수 삼축압축시험을 할 수 있는 방법을 이 논문에서 제안하였다. 이 방법으로 시험하면 하나의 공시체로 여러 단계의 시험을 하여 강도정수를 구할 수 있음은 물론 시험시간이 종전의 다단계시험에 비해 현저히 절약된다. 이 시험에 대한 적합성을 증명하기 위하여 불교란 시료와 재성형시료에 대해 표준압축시험과 재래의 다단계시험을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 여기서 제안하는 시험방법으로 결정된 강도정수는 다른 시험방법으로 얻은 강도정수와 잘 일치하였으며, 이 방법이 대단히 효과적이고 실용적이라는 것을 입증하였다.

1. 서 론

삼축압축시험은 안정계산에 요구되는 강도

정수를 구하는 시험으로서 현장조건에 일치되
게끔 응력상태와 배수조건을 적절하게 조절할
수 있는 이점때문에 설계목적으로 현재까지 널

리 사용되어 왔다. 그러나 표준으로 정하고 있는 삼축시험은 최소한도 3개의 공시체가 요구되므로 균질한 시료의 양이 충분하지 못할 때에는 이 시험을 수행하는데 어려움이 따른다. 실제로 자갈이 섞인 점토와 같은 불균질한 시료를 씬월 튜브(thin wall tube)로 채취하였다 하더라도 균질한 3개의 시료를 얻기가 힘들며, 불균질한 시료를 가지고 시험을 하였다면 강도정수를 정하는 데 무리가 있다. 또 하나의 단점은 연속해서 3번씩 시료조제를 하여 시험을 반복해야 하므로 시험시간이 길게 소요된다. 만일 한개의 삼축실로 시험을 수행한다면 강도정수를 얻는데 4~6일이 소비될 수 있으므로, 시험시간이 한정되어 있다면 주어진 기간내에 많은 양의 전단시험을 수행하는 것이 실제로 어렵다.

이와 같은 단점 때문에 한 삼축실 내에서 하나의 시료를 가지고 구속압력에 의한 압밀과 축차응력에 의한 전단을 반복하여 시험하는 소위 다단계 삼축압축시험(multi-stage triaxial compression test)이 여러 연구자에 의해 일찍부터 제안되었다. 포화토에 대한 다단계시험은 Kenney and Watson⁵⁾, Lumb⁹⁾ 및 Anderson¹⁾ 등에 의하여 연구되었으며, Ho and Fredlund⁴⁾는 불포화토에 대해서도 이 시험방법을 적용하였다. 이 연구자들은 배수시험 또는 비배수시험에 대해 변위속도를 정하는 방법을 제시하고 표준시험과 비교하여 강도정수의 일치성을 증명하였다. 長谷 등¹¹⁾과 桑 등¹²⁾은 조립재료에 대한 다단계시험을 연구하였다.

지금까지 제안되었던 다단계 삼축압축시험에서는 하나의 공시체를 가지고 시험하여 여러 개의 Mohr 원을 그릴 수 있고, 그 강도정수는 표준시험으로 얻은 결과와 거의 동일하다는 장점이 있다. 또한 다단계시험은 연약지반상에 단계적으로 성토를 하는 경우에 대한 모형시험이 될 수도 있다. 그러나 이 시험에서는 구속압력을 가하여 각 단계마다 24시간 압밀시켜야 하므로 실제로는 시험시간을 크게 절약할 수가 없다.

본 연구에서는 공시체에 처음부터 마지막 단계의 일정한 구속압력을 시험이 끝날때까지 가하여 둔채, 각 단계에서 필요한 유효구속응력이 얻어지는 시간(수십분)동안만 배수시킨 후 축압축을 가하고, 다음 단계의 압밀과 축압축을 같은 방법으로 반복하는 소위 일정구속압력 다단계삼축압축시험의 적정성을 검토해보려는 것이다. 이렇게 하면 4~6일 소요되는 재래식의 다단계시험에 비해 시험시간을 단시일내(1.5일)에 완료할 수 있다.

2. 일정구속압력 다단계 삼축압축시험 방법의 원리

2.1 기본원리

주어진 압력으로 포화점토를 압밀시킨다면 그림 1과 같은 간극비-경과시간에 대한 관계곡선을 얻을 수 있으며, 이 특성은 이론과 실험을 통해 이미 잘 알려져 있다. 이 곡선을 보면 압밀도가 대략 60%가 되기까지는 직선변화를 하므로 압밀이 빨리 진행되나, 그 이후에는 압축량의 변화가 점점 지체되어 100% 압밀이 완료될 때까지 압밀시키려고 한다면 상당한 시간이 소요된다. 표준 삼축압축시험 또는 재래식 다단계 삼축압축시험에서 공시체를 압밀시킬

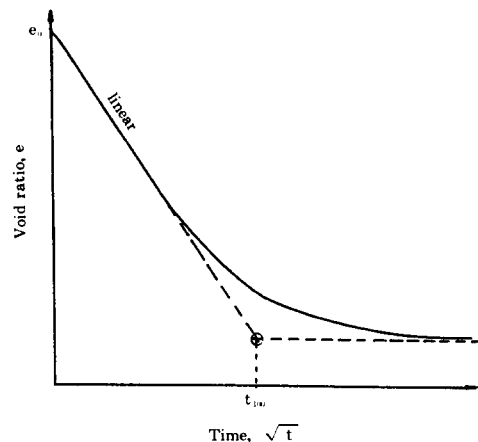


그림 1 압밀시간의 경과에 따른 간극비의 변화

때에는 각 압밀단계마다 주어진 압밀압력을 가하면 이 곡선을 따라 공시체는 100% 압밀이 완료되는데, 압밀소요시간을 일반적으로 24시간으로 잡고 있다.

그림 2의 (a) 곡선은 재래의 방법으로 압밀과 전단을 반복하면서 압밀비배수 삼축압축시험을 할 때 간극비의 변화를 보인 것이다. 각 단계의 압밀압력 σ_{c1} , σ_{c2} , σ_{c3} 로 압밀되었을 때의 간극비를 각각 e_1 , e_2 , e_3 라고 한다면, (b) 곡선을 따라 압밀시켜도 더 짧은 시간내에 각 간극비에 도달할 수 있을 것이다. (b) 곡선의 직선부분을 따라 압밀시키는 방법이 일정압력 다단계 삼축압축시험의 근본을 이룬다. 그런데, (b) 곡선의 경로를 따라 압밀시킬 때에는 각 압밀단계의 간극비에 대응하는 압밀시간을 어떻게 결정할 수 있는냐 하는 것이 문제가 된다. 이것은 압밀의 특성을 잘 이해함으로써 다음에 설명하는 방법으로 실험도중 결정될 수 있다.

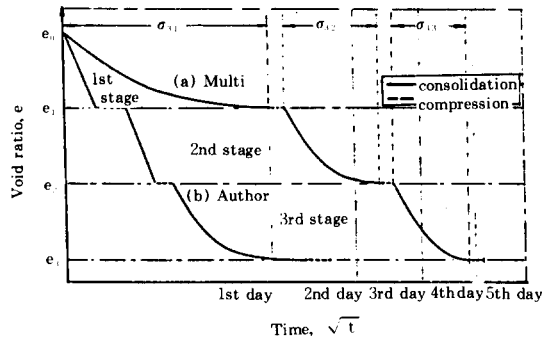


그림 2 일정구속압력 다단계시험과 기존 다단계삼축압축시험과의 압밀방법의 비교

2.2 시간 - 간극비변화 특성

일정한 압밀압력을 가하여 배수시키면 시간이 경과함에 따라 간극비가 감소된다. 경과시간의 제곱근과 간극비의 변화는 그림 1에 보인 바와 같이 압밀이 상당히 진행될 때까지 직선상을 보이다가 압밀의 최종단계에서는 곡선이 된다. 이 직선부분에 대한 관계를 식으로 표시

하면 다음과 같다.

$$e = a - b\sqrt{t} \dots\dots\dots (1)$$

여기서,

a, b : 상수

t : 압밀배수시간

e : t 시간 배수후의 간극비

2.3 간극비 - 유효응력 특성

압밀시험을 하여 얻은 압밀곡선을 보면 간극비는 유효응력의 대수값에 대략 비례하여 감소한다는 사실을 알 수 있다. Bjerrum²⁾이 제시한 바와같이 aging이 일어난 점토에 대해서도 대략 직선관계가 성립한다. 이 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$e = a' - b' \log \sigma_c' \dots\dots\dots (2)$$

여기서,

σ_c' : 임의 압밀배수시간에서의 유효구속응력

e : 임의 압밀배수시간에서의 간극비

a', b' : 상수

2.4 경과시간에 다른 유효응력 증가 특성

식(1)과 식(2)는 동일하므로 $e - \sqrt{t}$ 의 직선구간에서는 다음과 같은 식이 성립된다.

$$a' - b' \log \sigma_c' = a - b\sqrt{t}$$

$$\log \sigma_c' = a'/b' - a/b' + b/b'\sqrt{t}$$

이것을 정리하면 식(3)이 된다.

$$\log \sigma_c' = a'' + b''\sqrt{t} \dots\dots\dots (3)$$

여기서

a'', b'' : 상수

압밀과정의 초기에 간극수압을 측정하여 위 식의 상수를 결정한다면, 간극비의 변화가 경과시간의 제곱근에 비례하는 범위내에서는 요구되는 유효구속 압력에 도달하는 시간을 (3) 식으로부터 구할 수 있다.

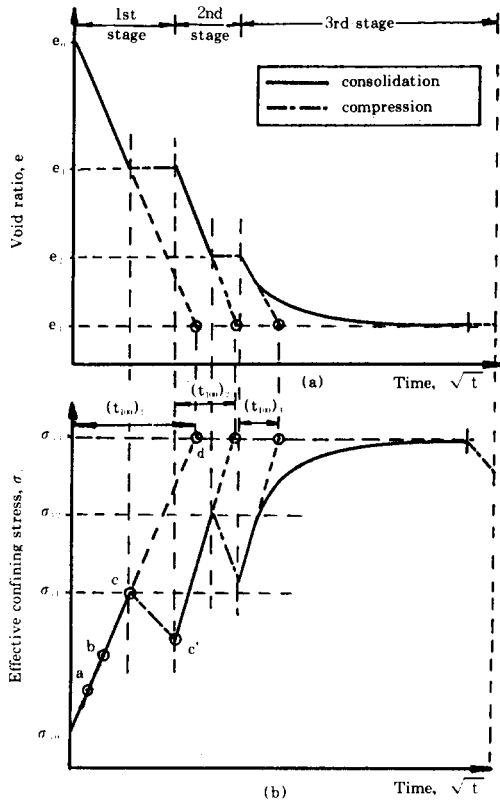


그림 3 일정구속압력 다단계삼축압축시험의 원리
(a) 간극비와 경과시간과의 관계
(b) 유효구속압력과 경과시간과의 관계

그림 3은 위의 원리를 이용하여 최종단계의 구속압력 σ_{33} 의 압력을 가하고 3단계로 압밀과 전단시험을 하였을 때, 각 단계에서의 압밀시간을 결정하는 방법을 보인 것이다. 최종구속압력을 가하고 배수를 시키면서 간극수압을 측정하면 경과시간에 따라 유효응력이 어떻게 변화하는가를 알 수 있다. 그림 3(b)의 a, b점은 이와 같이 하여 정해진 측정점이다.

위에서 설명한 바와 같이 이 측정점들은 직선상에 있어야 하므로 그 연장선과 1단계의 구속압력 σ_{31} 과의 교점(c점)에 대응하는 시간이 σ_{31} 에 도달하는 경과 시간이 된다. 이 시간이 되었을 때 배수를 중단하고 즉시 1단계의 전단시험을 할 수 있다. 전단시험을 하는 동

안에는 압밀배수시험에 있어서는 간극비는 일정하다. 그러나 축차응력이 가해짐으로서 간극수압이 발생함으로 유효구속압력은 c점으로 감소된다.

2단계에서도 1단계와 같은 방법을 적용하여 그 단계에서 요구되는 유효구속압력에 도달할 수 있는 압밀시간을 정하고 전단시험을 할 수 있다. 그러나 3단계에서의 간극비의 변화는 그림 3(a)에 보인 바와 같이 직선관계가 아니므로 앞 단계와 같은 방법으로 소요압밀시간을 정한다면 과소압밀이 된다. 따라서 최종단계에서는 충분한 시간동안 압밀시켜야 한다.

그림 3의 측정점 a, b를 연결한 연장선이 일정 구속압력(σ_{33})과 만나는 시간이 그림 1의 t_{100} 과 같은 시간이 된다. 이 값은 전단속도를 결정하는데 참고가 되는 중요한 값이다.

2.5 응력경로

그림 4는 정규압밀점토에 대한 다단계시험의 응력경로를 나타낸 것이다. 일정구속압력 다단계시험에 있어서는 구속압력이 일정하므로 전응력경로(total stress path)는 1단계 전단과정에서 H에서 J로 움직이고 전단이 완료되면 H으로 내려왔다가 2단계에서는 다시 같은 경로를 따라 K까지 올라가고, 3단계에서는 L까지 올라간다. 반면, 재래식의 다단계시험에서는 각 전단단계 마다 BC', EF', HI'와 같은 경로를 보인다.

그러나 위의 두가지 다단계시험에 대한 유효응력경로(effective stress path)는 동일하다. 즉 1단계 전단에서는 B에서 C으로 올라가 k_1 선에 도달하고 난후 제2단계 압밀시에는 D로 내려와 E로 진행한다. 2단계 전단시에는 F으로 올라가고 3단계 압밀시에는 G로 내려와서 H까지 진행한다. 이러한 과정을 반복하면서 I까지 진행하여 3단계 전단이 완료된다.

어떤 흙이 가지는 압밀특성과 전단특성이 전단계의 축변위에 관계없이 일정하다면, 다단계시험의 각 단계에서의 응력경로와 표준삼축압

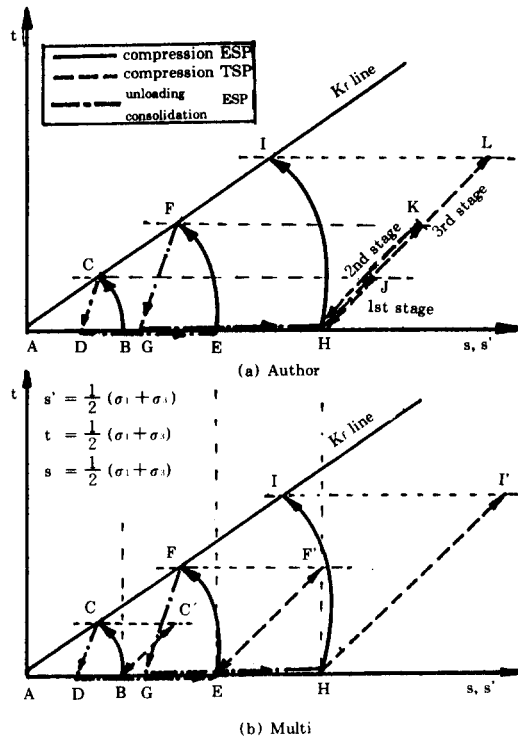


그림 4 (a) 일정구속압력 다단계시험과 (b) 재래식 다단계시험의 응력경로 비교

축시험의 응력경로(복잡성을 피하기 위해 이 그림에는 표시하지 않았음)는 모두 k_f 선에 도달된다. 따라서 어떤 방법으로 시험하든간에 강도정수 c' 와 ϕ' 는 동일한 값을 나타내게 될 것이다.

3. 시험

3.1 시험기구

본 연구시험에 사용한 삼축압축시험기구는 영국제 ELE사 제품으로서 변위 제어형이며, 축변위 조절가능 속도는 0.0001-5.0mm/분 이고 가압장치는 오일과 물의 모터 시스템 (motorised oil-water system)으로 되어 있다. 간극수압은 전자변위계를 이용한 자동압력측정장치로 측정하였고, 배수량과 체적변화측정은 로링 다이어프램형 체적변화 자동측정기를 사용하였다. 삼축압축시험기구의 배관도는 그림 5와 같다.

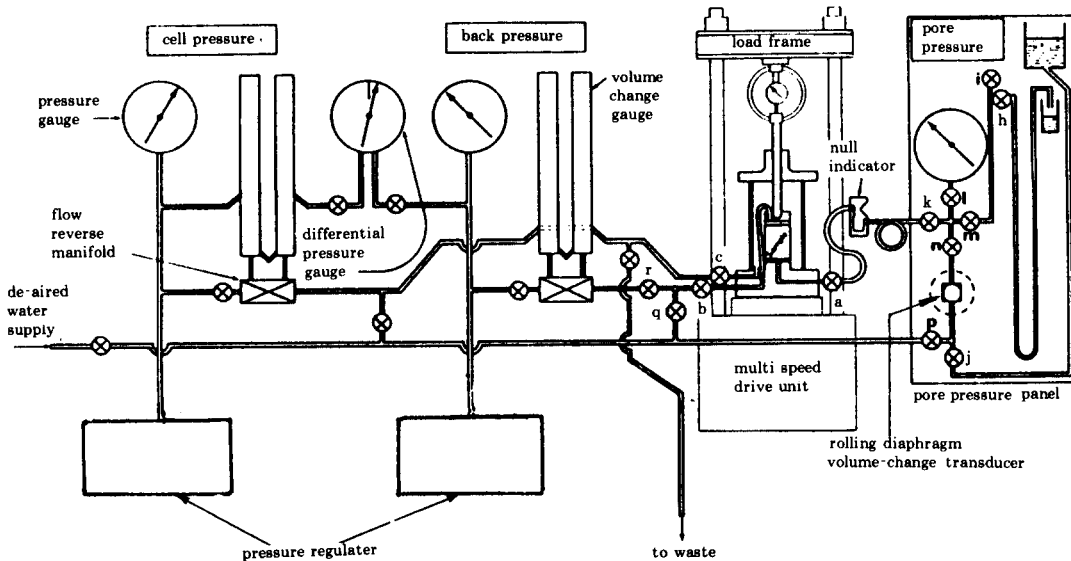


그림 5 삼축압축시험기구 배관도

3.2 시험시료

본 시험에 사용한 시료는 경기도 화성군 반월 해안에서 채취한 해성퇴적토의 불교란 시료(CH)와 경남 함양군 서하지구 댐의 심벽(core)재료로 사용될 점토(CL)인 교란시료의 두 종류이다. 각 시료에 대한 물리성 시험결과 는 표 1과 같다.

3.3 시험방법

위의 두가지 시료에 대하여 일정구속압력 다 단계 삼축압축시험(author)을 실시하고, 동일한 조건으로 표준삼축압축시험(std)과 기존 다단계삼축압축시험(multi)을 실시하여 결과를 비교하였다. 표준시험에 있어서는 공시체 3개를 준비하여 주어진 압밀압력으로 24시간 이상 압밀시킨 다음 비배수조건으로 축압축을 가하였다. 기존 다단계시험은 1단계 압밀압력으로 24시간 이상 압밀시키고 소요축변위까지 축압축을 가한 후, 다시 다음 단계 압밀압력으

로 24시간이상 압밀시켜 재차 축압축을 가하면서 2, 3단계의 시험을 하였다.

여기서 제안하는 일정 구속압력 다단계 시험에 있어서는 다음과 같은 방법으로 시험하였다.

(1) 공시체 준비

불교란시료의 공시체는 직경 35mm, 높이 70mm로 성형하고, 서하점토의 교란시료는 KS F 2312의 A 다짐방법에 따라 다짐을 하여 다짐률 95%가 되게끔 공시체를 만들었다.

(2) 백 프레스에 의한 포화

공시체를 삼축셀안에 설치하고, 횡압과 백 프레스를 0.5kg/cm²로부터 포화가 될 때까지 단계적으로 증가시키면서 포화시켰다. 단계적 백 프레스 증가방법은 처음에 셀 압력라인과 셀 안에 0.5kg/cm²의 구속압력을 가한 후, 이보다 0.1~0.05kg/cm² 작게 백 프레스를 15분정도 공시체에 가하고, 그 다음에는 구속압력과 백 프레스를 0.5kg/cm² 씩 단계적으로 증가시키

표 1 시험시료의 물리적 특성

시 료 명 (Sample)		불교란점토 (반월)	재성형점토 (서하)	비 고
심 도 (Depth), (m)		1.0		
입 도 시험	모래(0.074~4.75mm), (%)	0.6	41.7	
	실트(0.002~0.074), (%)	58.4	29.3	
	점토(0.002mm 이하), (%)	41.0	29.0	
조 도 시험	액 성 한 계, (LL) (%)	57.8	36.8	
	소 성 한 계, (PL) (%)	21.8	23.0	
	소 성 지 수, (PI) (%)	36.0	13.8	
통 일 흙 분 류 (U.S.C)		C H	C L	
흙 의 비 중 (Specific Gravity)		2.663	2.659	
자 연 상 태	함 수 비 (W _n), (%)	60.1	24.8	
	단 위 중 량 (γ _t), (g/cm ³)	1.621		
	간 극 비 (e),	1.63		
	포 화 도 (S), (%)	98.2		
다 짐 시험	최 대 건 조 밀 도 (γ _a) (g/cm ³)		1.54	A 다 짐
	최 적 함 수 비 (ω) (%)		22.4	

는 것이다. 단계적으로 압력을 가하면서 간극수압을 측정하면 간극수압계수 B를 계산할 수 있고 이 값이 0.97 이상이 되면 포화가 완료된 것으로 간주하였다.³⁾ 불교란 시료는 2~2.5 kg/cm², 재성형시료는 2.5~3.5 kg/cm² 이 되었을 때 B계수는 이 값에 도달하였다. 포화를 시키는데 일반적으로 2.5~4시간이 소요되었으나 시료와 고무박막 사이에 공기량이 많으면 많을수록 더 큰 압력과 더 많은 시간이 소요되었다.

(3) 구속압력을 일정하게 유지

간극수압계수가 0.97 이상이 되었을 때의 백프레셔보다 최종구속압력(2kg/cm²)만치 높게 구속압력을 가하고 시험이 종료할 때까지 일정하게 유지시켰다.

(4) 압 밀

1단계의 유효구속압력을 0.5kg/cm²로 정하고, 압밀배수밸브를 열어 압밀배수시키면서 배수량을 정해진 간격(0.25, 1, 2.25, 4, 분...)으로 측정하였다. 각 단계의 압밀도중에 2회(4분과 9분)이상 배수밸브를 잠그고 간극수압을 측정하여 $\log \sigma - \sqrt{t}$ 곡선을 그려서 2장에서 설명한 바와 같이 1, 2단계의 압밀시간을 구하고 동시에 t^{100} 을 구하였다.

(5) 비배수 압축시험

압밀비배수 시험에서 간극수압을 정확하게 측정하기 위해서는 축압축속도를 충분히 느리게 해야 한다. Lumb⁶⁾는 압축속도가 크면 c' 은 크게 ϕ' 은 작게 측정된다고 하였다.

1단계의 유효구속압력(0.5kg/cm²)이 도달되면 배수밸브를 잠그고 전단시험을 하였다. 전단시의 변위속도는 Head³⁾의 추천방법에 따라 다음과 같이 정하였다. 즉, 공시체의 축변위가 10%(축변위 = $70 \times 0.1 = 7.0\text{mm}$)에 이를 때 파괴에 이른다고 가정하면 변위속도 v 는

$$v = 7/t_f = 7/(1.77 t_{100}) \quad (\text{mm/min})$$

이 된다. 여기서 t_f 는 전단파괴소요시간으로 측면 및 양면배수조건이므로 $t_f = 1.77t_{100}$ 으로 하였으며, t_f 가 2시간보다 작으면 최소 2시간으로 하였다. 이와 같이하여 정한 변위속도는 반월 불교란점토에 대하여 0.031~0.029mm/min ($t_{100}=120-135$ 분), 서하 재성형점토에 대해서는 0.058mm/min($t_{100} = 25-36$ 분)가 되었다.

(6) 전단변위의 한계기준

다단계 삼축압축시험에서는 각 단계마다 어느 한계까지 전단변위가 발생하도록 하느냐 하는 것이 대단히 중요하다. 충분한 전단변위가 발생하지 않았을 때에는 강도정수를 과소측정하게 될 것이고 변형이 지나치면 중간단계에서 공시체의 파괴를 가져올 수 있기 때문이다. 이론적으로 말하면 이 한계는 응력경로가 k_f 선에 도달하는 변위가 되겠지만 시험중에는 이것을 알 수가 없다.

일반적으로 정규압밀 불교란점토는 비배수 시험에서 응력경로가 k_f 선에 도달하면 축차응력의 증가는 거의 없고 간극수압의 증가가 정지되므로 응력경로가 한점에 모이는 특성을 보인다. 이 특성을 이용하여 반월점토의 불교란 시료에 대한 1, 2단계의 축압축변위 한계기준은 간극수압증가가 정지하고 축차응력증가가 거의 없는 점까지로 하였다.

Lambe⁶⁾, Lambe and Whitman⁸⁾, Head³⁾ 등이 잘 언급하고 있는 바와 같이 과압밀 점토 및 재성형 점토의 비배수시험에 있어서는 응력경로가 k_f 선에 도달하면 일반적으로 이 선을 따라 올라간다. 따라서 서하점토의 재성형시료에 있어서는 간극수압이 증가하다가 감소하면서 축차응력이 계속 증가하므로 간극수압 감소량과 축차응력 증가량의 비($\Delta\mu/\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$)가 일정하게 되는 점까지로 하였다. 이와같이 하였을 때 1, 2단계에서의 축압축변형률은 약 4.0~5.0%가 되며, 3단계에서는 10%까지 변위가 일어나도록 하였다.

(7) 다음 단계에서의 압밀과 전단

1단계의 시험이 끝난 유효구속압력을 1.0 kg/cm^2 으로 증가시키고 위에서 설명한 순서로 시험을 반복하였다. 3단계 시험에 있어서는 유효구속압력이 2kg/cm^2 가 될 때까지 24시간 이상 충분히 배수시키고 축하중을 가하였다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 등방압밀 특성

그림 6과 그림 7은 두가지 공시체에 대해 일정구속압력 삼축시험과 재래식 다단계시험의 등방압밀특성을 비교한 것이다. 일정 구속압력으로 등방압밀시키면 시간-간극비 관계는 배수시간 초기에 직선으로 나타나므로 재래식 다단계시험과 비교할 때 요구되는 간극비까지 압밀이 완료되는 시간이 현저히 빨라진다는 것을 알 수 있다. 일정구속압력 다단계 시험의 1, 2단계 압밀은 반월점토에 대해 16분과 49분, 서하점토에 대해서는 6분과 12분에 완료되었으며, 3단계 압밀은 24시간 정도가 필요하였다. 그러나 재래식 다단계시험에서는 각 단계 모두 24시간이 요구된다.

또한 이 그림들을 보면, 일정한 구속압력을 유지하면서 앞서 설명한 바와 같이 압밀시간을

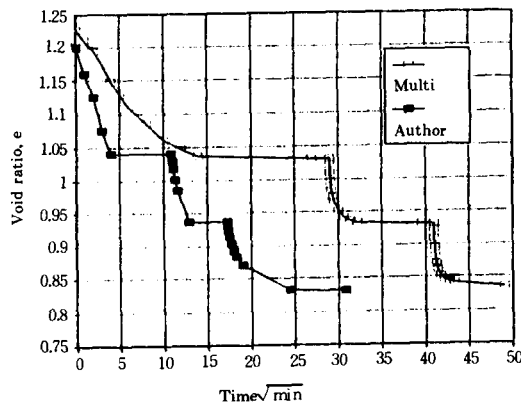


그림 6. 반월 불교란점토에 대해 각 압밀단계에서 얻어지는 간극비와 경과시간과의 관계

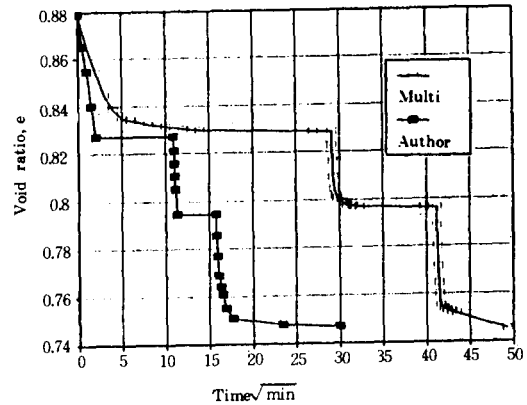


그림 7. 서하 재성형 점토에 대해 각 압밀단계에서 얻어지는 간극비와 경과시간과의 관계

정하여 각단계의 압밀압력까지 압밀시킬 때 얻어지는 간극비는 각 단계마다 24시간 배수시켜서 얻어지는 간극비와 거의 동일하게 할 수 있다는 것을 알 수 있다.

4.2 압밀배수에 따른 유효응력 증가 특성

압밀 배수시간에 따라 증가되는 유효 구속압력($\log \sigma'_c$)은 그림 8에 보인 바와 같이 Δt 에 비례하는 직선관계를 나타내었다. 이것은 2장에서 설명한 일정구속압력 다단계시험의 이론적 배경과 잘 일치한다. 반월 불교란점토에 대해서는 식(3)을 근거로 하여 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$1 \text{ 단계 압밀 : } \sigma'_c = 10^{(0.745+0.095\sqrt{t})} \dots\dots (4)$$

$$2 \text{ 단계 압밀 : } \sigma'_c = 10^{(0.553+0.076\sqrt{t})} \dots\dots (5)$$

$$3 \text{ 단계 압밀 : } \sigma'_c = 10^{(0.260+0.049\sqrt{t})} \dots\dots (6)$$

그림 8(b)의 곡선에서 각 압밀단계의 축점을 연장하여 최종구속압력과 만나는 점이 t_{100} 이 된다. 불교란점토에 대해서는 1, 2, 3단계의 압밀단계에 대하여 각각 121분, 135분, 135분이 얻어졌고, 재성형점토에 대해서는 각각 22분, 26분, 30분이 얻어졌는데 표준시험과 잘 일치

하였다. 서하점토에 대해서도 그림 8과 비슷한 관계곡선이 얻어졌는데 여기서는 지면관계상 생략하였다. 이에 대한 자세한 내용에 대해서는 김³¹⁾의 논문을 참조하기 바란다.

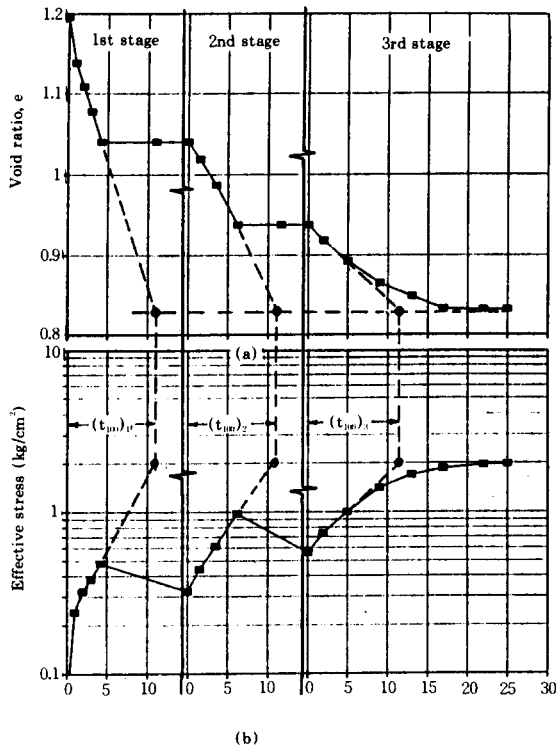


그림 8. 반월 불교란점토에 대한
(a)간극비의 감소와 경과시간과의 관계
(b)유효응력의 증가와 경과시간과의 관계

4.3 변위-응력 특성

그림 9에 나타난 바와 같이 반월 불교란 점토에 대한 기존 다단계시험과 일정구속압력 다단계시험의 응력-변위곡선은 서로 잘 일치한다. 그림 10의 서하 재성형점토에 있어서는 일정구속압력 다단계시험이 약간 크나 3단계에서는 잘 일치하고 있다. 표준시험과 일정구속압력 다단계시험을 비교해보면 두 점토 모두 2, 3단계에서 전자가 더 적게 나타났다. 다단계

시험에서는 반복재하에 의하여 입자가 재배열되고 전 단계에서 축변위가 이미 어느 정도가 해져 있기 때문에 표준시험과의 정확한 일치성을 기대하기가 사실상 어렵다. 더욱이 다단계 시험의 2, 3단계의 압밀과정에서는 전단계에서 먼저 축차응력이 가해짐으로써 입자가 재배열을 하였을 것이므로 간극수압이 적게 발생되고 축차응력은 약간 크게 나타나는 것으로 판단된다. 그러나 모든 조건이 동일하다면 1단계의 응력-변형곡선은 동일한 경로를 따라야 할 것이다.

그림 10의 서하 재성형점토에서 1단계의 일정구속압력 다단계시험의 곡선이 재래식 다단

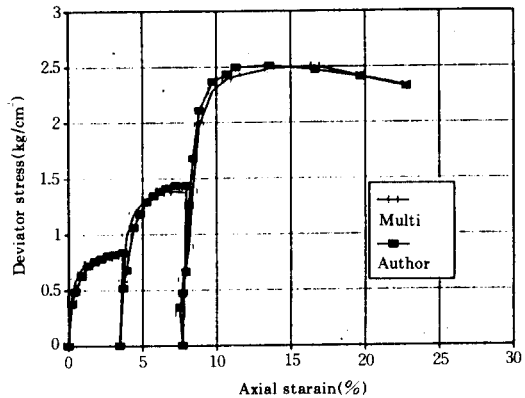


그림 9. 반월 불교란 점토의 응력-변형 곡선

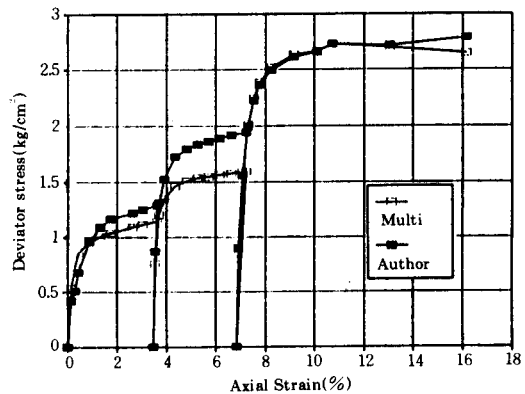


그림 10. 서하 재성형점토의 응력-변형곡선

계시험의 곡선보다 약간 높게 그려졌다. 이것은 후자에 비해 약간 높게 압밀되었기 때문이라고 생각된다. 전자의 시험에서는 구속압력의 크기는 전적으로 배수시간에 의존하기 때문에 실제의 시험에서는 얼마든지 그런 경우가 있을 수 있다. 그러나 Mohr 원은 유효구속압력을 기준으로 하여 그리므로 나중에 설명하는 바와 같이 강도정수는 거의 차이를 보이지 않는다.

4.4 축압축과정의 간극수압

일정구속압력 다단계시험에서는 처음부터

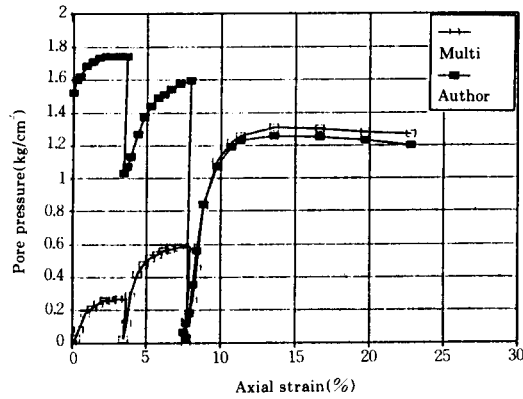


그림 11. 반월 불교란 점토에 대해 각 시험방법에 따른 축압축시 간극수압의 비교

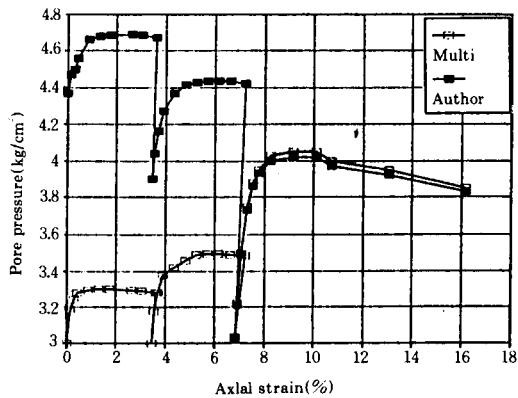


그림 12. 서하 재성형 점토에 대해 각 시험방법에 따른 축압축시 간극수압의 비교

최종단계의 횡압을 가하므로 간극수압은 그림 11과 그림 12에 보인 바와 같이 압밀과정에서는 단계적으로 감소하는 모양을 보이나, 축압축 과정의 간극수압 증가경향은 기존 다단계시험과 거의 일치한다.

4.5 간극수압계수 A

그림 13과 그림 14를 보면 다단계시험에서는 모두 각 전단 단계마다 간극수압계수 A가 달라지며 최종단계에서 가장 크게 나타난다. 이론적으로 보면 반월점토에 대하여 정규압밀 토일 경우 2, 3단계의 표준시험결과와 같이 모든 압축단계에서 동일한 값을 보여야 하나 1단계의 A계수는 다단계시험과 표준시험에서 모두 같은 값으로 적게 나타났다. 이는 1단계의 구속압력인 0.5kg/cm^2 으로서는 과압밀상태에 있기 때문이다. 그림 15에서 이 구속압력의 표준시험에 대한 응력경로가 오른쪽으로 치우친 것도 이 때문이다. 2, 3단계에서 다단계시험과 본 시험의 A계수가 표준시험보다 적게 나타난 것은 전단계의 축압축변위로 인해 비등방압밀되었기 때문으로 판단된다.

서하 재성형점토는 표준시험에서도 구속압력에 따라 A계수가 달라진다는 것을 유의할 수 있으며, A계수는 변형률 3%에서 최대치

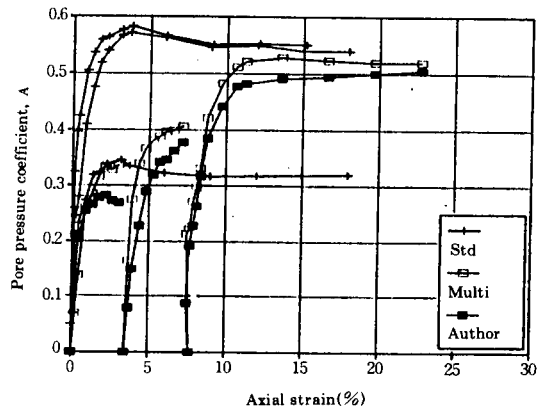


그림 13. 반월불교란 점토의 A계수

(A=0.58)을 보인 후 변형이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 본 재성형시료는 다짐률 95% 조건으로 시료를 성형하기 위하여 어느 이상의 유효구속응력을 가하여야 하므로 과압밀되기 때문으로 판단된다.

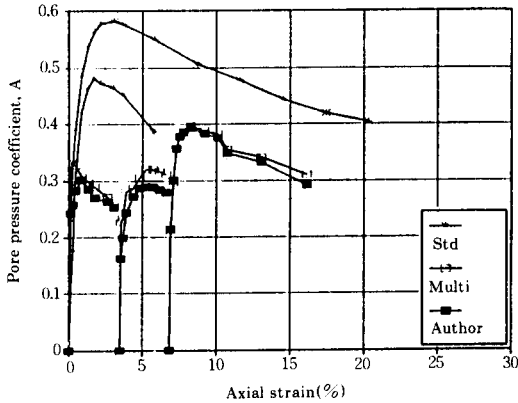


그림 14. 서하재성형 점토의 A계수

4.6 응력경로

그림 15와 그림 16은 시험방법에 따른 유효 응력경로의 변화를 보여준다. 반월 불교란점토의 2, 3단계의 표준시험은 전형적인 정규압밀 점토의 응력경로를 나타내고 서하재성형점토는 약간 과압밀된 재성형시료의 전형적인 응력 경로를 나타낸다. 다단계시험에 있어서는 간극 수압발생이 상대적으로 적으므로 경미한 과압 밀도의 경향을 보인다.

다단계시험과 표준시험의 응력경로를 비교 해 보면 변형이 어느 정도 진행된 이후부터 차이가 나타난다. 즉 표준시험에 있어서는 오른쪽으로 진행하다가 k_f 선에 도달한 후에는 다시 이 선을 따라 올라간다. 그러나 다단계시험에서는 마치 과압밀점토의 응력경로와 같은 성향을 보이면서 k_f 선에 이른다. 이 그림들을 보면 동일한 흙에 대해 응력경로는 시험방법에 따라 약간씩 다른 경향을 보이지만 파괴점에 도달하면 같은 k_f 선에 수렴한다는 것을 알 수

있다. 이것은 시험방법이 다르다 하더라도 거의 동일한 강도정수를 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 그러나 다단계시험에서는 k_f 선에 도달할 수 있는 변형률의 한계를 정하는 것이 무엇보다 중요하다. 본 시험에서 응력경로의 결과를 보면, 정규압밀 불교란점토는 축차응력의 증가가 거의 없고 간극수압이 일정하게 되었을 때 응력경로가 k_f 선에 도달하여 거의 한점에 모이는 특성을 보였고, 재성형 점토는 k_f 선에 거의 도달하면 간극수압이 감소하면서 축차응력이 계속 증가하므로 $\Delta\mu/\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$ 가 일정해지는 특성을 보였다.

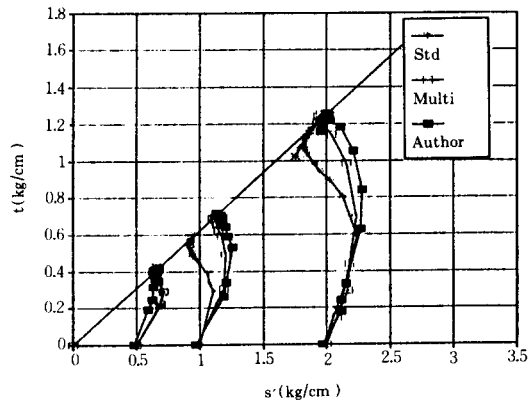


그림 15. 반월 불교란 점토에 대한 응력경로

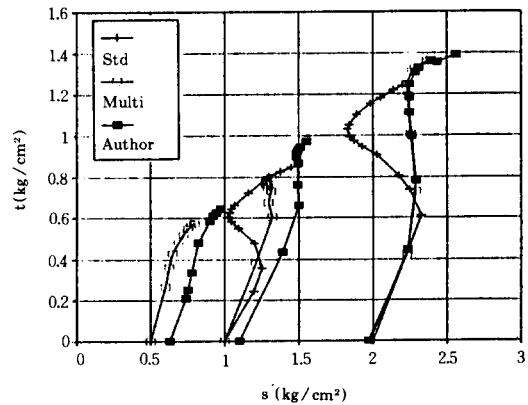


그림 16. 서하 재성형 점토에 대한 응력경로

4.7 강도정수

응력경로의 결과로부터 아는 바와 같이 어떤 시험방법의 응력경로도 k_f 선상에 놓이므로 강도정수는 거의 차이가 나지 않는다는 것을 충분히 예상할 수 있다. 표 2는 표준시험, 기존다단계시험 및 일정구속압력 다단계시험으로 결정한 점착력과 전단저항각을 비교하여 보인 것이다. 이 표를 보고 아는 바와 같이 유효응력으로 표시한 전단저항각의 표준시험과의 차이는 1° 이내 이므로 일정압력구속하의 삼축압축시험은 강도정수를 얻기 위한 시험으로서는 매우 효과적이며 실용적이라고 판단된다.

5. 결 론

불교란시료와 재성형시료의 각각 1개의 공시체에 대해 백 프레셔와 최종구속압력을 합친 높은 구속압력을 가한 후, 3단계의 압밀비배수 삼축압축시험을 수행하였다. 이와 같은 시험방법의 다단계시험에서는 1, 2단계에서의 등방압밀배수시간을 정하는 것이 중요하므로 이 시간을 결정하는 방법을 제안하였으며, 이 방법으로 시험함으로써 시험시간을 현저히 감소시킬 수 있음을 보였다.

동일한 시료에 대하여 표준 삼축압축시험과 기존의 다단계시험을 수행하고, 그 결과를 여기서 제안하는 일정구속압력 다단계시험의 결

과와 비교하였다. 다단계시험은 중간단계에서 응력조건이 달라지므로 응력경로는 다소 차이가 있으나, 어느 시험이든간에 응력경로의 종착점은 k_f 선상에 놓이였다. 전응력으로 표시한 전단저항각은 최대 1.2° 의 차이를 보였지만 유효응력으로 표시한 전단저항각은 최대 0.7° 의 차이밖에 보이지 않았다. 따라서 이 시험방법은 강도정수의 결정에 관한 한 대단히 효과적이고 실용적이라는 것이 증명되었다. 그러나 간극수압계수 A는 중간압밀단계에서 강성이 커지기 때문에 다소 낮은 값을 보였다.

여기서 제안하는 시험방법으로 시험을 할 때에 백 프레셔를 사용하여 시료를 97% 이상 포화시키는 것이 무엇보다 중요하다. 또한 간극수압과 체적변화를 정확히 측정할 수 있는 정교한 시험기구가 요구된다.

참 고 문 헌

1. Anderson, W.F.(1974). "The use of multi-stage triaxial tests to find the undrained strength parameters of stony boulder clay". Proc. Inst. Civ. Eng. Technical Note No. TN 89.
2. Bjerrum, L.(1972). Embankment on soft ground, Proc. Spec. Conf. Performance of Earth and Earth-Supported Structures, Lafayette, Indiana, Vol.2, pp.1~54.
3. Head, K.H.(1985). "Manual of soil laboratory testing Vol.3: Effective stress tests."

표 2 시험방법별 전단강도정수

시 료 명	시험방법	유효응력 개념		전 응력 개념		차이 ϕ' (%)	비고
		c' kg/cm ²	ϕ' 도	c kg/cm ²	ϕ 도		
불교란 시 료	AUTHOR	0.04	35.8	0.12	20.9	99	
	MULTI	0.04	35.8	0.09	20.9	99	
	STD	0.05	36.0	0.10	19.7	100	
교란 시료	AUTHOR	0.10	33.8	0.18	21.5	102	다짐율 95%
	MULTI	0.09	33.8	0.19	20.8	102	
	STD	0.07	33.1	0.17	20.3	100	

4. Ho, D.Y.F. and Fredlund, D.G.(1982(b)). "A multistage triaxial test for unsaturated soils". Geotechnical Testing J., Vol.5, No.1/2, pp. 309~364.
5. Kenney, T.C. and Watson, G.H.(1961). "Multiple-stage triaxial test for determining c' and ϕ' of saturated soils". Proc. 5th Int. Con Soil Mechanics and Foundation Eng. Paris, Vol.1, pp.191~195
6. Lambe, T.W.(1967) "Stress Path Method" Journal of the soil mechanics and Foundations Division, ASCE, Nov. 1967 SM 6 pp.309~331
7. Lambe, T.W.(1979) Stress Path Method: second Edition Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, June 1979 GT 6. PP.727-739
8. Lambe, T.W. and Whitman, R.V.(1979). Soil Mechanics(VI Version). Wiley New York.
9. Lumb, P.(1964), "Multi-stage triaxial tests on undisturbed soils." Civ.Eng. & Public Works Review, May, 1964. pp. 592-595.
10. Lumb, P.(1968). "Choice of strain-rate for drained tests on saturated soils". Correspondence, Geotechnique, 18:4:511.
11. 長谷川昌弘, 村上清基, 關 眞一, 佐野公彦, 小野洋(1986). "多段階三軸試験での粗粒材料の強度特性について". 日本土質工學會 粗粒材料の變形, 強度特性とその試験法に関するシンポジウム 表論文集 pp. 15-22
12. 桑原 洋, 山口茂行, 岩本 健(1986). "多段階三軸壓縮試験法の粗粒材料への適用性の検討". 日本土質工學會 粗粒材料の變形, 強度特性とその試験法に関するシンポジウム 表論文集 pp.23-26
13. 김현태(1993). "일정 구속압력 다단계 삼축압축 시험" 동국대학교 토목공학과 석사학위논문 1993. 2

(접수일자 1993. 2. 15)