

## 정지토압계수의 측정장치 개발에 관한 연구<sup>+</sup>

송 무 효\*

(99년 3월 2일 접수)

### A Study on the Development of Measuring Equipment for Coefficient of Earth Pressure at Rest

Mu-Hyo Song\*

**Key Words :**  $K_0$ (정지토압계수), Oedometer(압밀시험기), Lateral Pressure(측압), Load Cell(토압계)

#### Abstract

For existing  $K_0$ -oedometer, the lateral wall of the ring is cut thinly to make space and by filling the space with water or mercury to keep the balance to the lateral pressure of a specimen, the pressure of the fluid is checked for the pressure of the specimen.

But the devices to keep the balance to the lateral pressure of a specimen are complicated, difficult to manufacture and expensive.

As newly developed  $K_0$ -oedometer is equipped with the load cell which can resist higher pressure than the lateral pressure of the specimen, there is nearly no deformation due to the lateral pressure of the specimen.

And the measuring is cheap and easy as there are fewer accessories.

#### 1. 서 론

일반적으로 응벽과 같은 측압을 받는 구조물은 약간의 변위를 허용하므로 응벽 뒷면의 흙은 정지 상태에 있지 않기 때문에 체적변화가 일어난다고 본다.

이는 선형등방성 재료에 대한  $K_0$ (coefficient of earth pressure at rest)값은 poisson비의 항에서

직접적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_0 = \nu / (1 - \nu)$$

여기서  $K_0$  = 정지토압계수

$\nu$  = poisson비

따라서  $K_0$ 는 탄성 parameter이며, 필요에 따라 흙에 대한 가정을 하여 응용할 수도 있다.

$K_0$ 값은 측면 구속상태 하에서 흙의 응력-변위에 대한 특성과 매설구조에 대한 토압, 굴착 또는

+ 이 논문은 1998학년도 동의대학교 자체 학술연구조성비의 지원을 받아 작성되었음.

\* 정회원, 동의대학교 공과대학 토목공학과

사면의 굴착, 주변의 항복, 용벽굴착에서의 측압 그리고 견고한 용벽에 작용하는 압력문제의 해석에 중요한 기술적인 가치가 있다.

또한 다짐에 의해서 발생하는 토압은 정지상태 하에서 하중이 반복하여 loading 및 unloading되는 경우에 벽체와 뒷채움의 접촉면에서 발생하는 수평응력으로 생각할 수 있다. 고정벽체와 같이 비교적 강성이 크고 벽체가 연직이며, 벽마찰 및 벽체 변위가 없는 경우에는 정지상태로 볼 수 있다.

실제로 고정벽의 뒷채움 흙은 정지상태라고 볼 수 없다. 그러므로 정지상태일 때 뒷채움 다짐의 진행 과정에 따른 흙의 응력경로(stress path)를 유추하기 위해서는 다주기 이력모형(multicycle hysteretic model)이 요구된다.

이에 대한 측정방법은 측압을 측정할 수 있도록 고안된 삼축압축시험기나 압밀시험기에 의해서 수직응력에 대한 수평응력을 구한다.

즉, 수평방향변위가 없는 경우에 작용하는 수평응력을 말하며, 이때의 토압계수를 정지토압계수( $K_0$ )라고 하며 다음 식으로 표시한다.

$$K_0 = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (1)$$

여기서  $\sigma_h$  : 지반내의 요소에 작용하는 수평응력

$\sigma_v$  : 지반내의 요소에 작용하는 수직응력

이때 수직응력은 깊이(Z)에 따라 일정하게 증가하며, 그 값은  $\sigma_v = \gamma Z$ 가 된다. 따라서 정지 토압은 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$\sigma_h = K_0(\gamma Z) \quad (2)$$

여기서  $\gamma$  : 흙의 단위 중량

Z : 지표면으로부터의 깊이

윗 식에서  $K_0$ 의 결정에 문제가 되는데, 이에 대해서는 다음과 같은 식들이 제안되어 있다.

사질토의 경우, Jaky<sup>1)</sup>의 공식은 다음과 같다.

$$K_0 = 1 - \sin \bar{\phi} \quad (3)$$

Brooker와 Ireland<sup>2)</sup>에 의해 제안된 정규압밀점토에서  $K_0$ 의 공식은 다음과 같다.

$$K_0 = 0.95 - \sin \bar{\phi} \quad (4)$$

식 ③,④에서의  $\bar{\phi}$ 는 삼축압축시험에서 구한 배수마찰각이며, 과압밀점토에서의 정지토압계수는 다음 식에 의해 근사적으로 구할 수 있다.

$$K_{0(oc)} = K_{0(nc)}\sqrt{OCR}$$

$$OCR : \text{과압밀비} = \frac{\text{선행압밀하중}}{\text{현재받고있는하중}}$$

정규압밀점토에 대해서는 Alpan<sup>3)</sup>에 의해 제안된 실험식이 있다.

$$K_0 = 0.19 + 0.233 \log(PI) \quad (5)$$

여기서 PI : 소성지수

$K_0$ 의 측정방법은 모래입자를 공중낙하시켜 작성한 공기전조모형을 이용하여 loading, unloading, reloading 그리고 multi-cycle loading에 의한 방법으로 구한  $K_0$ 값을 model화 하여 (Fig. 1.1), 연직응력이 결정되면 그 값에  $K_0$ 값을 곱하여 수평응력을 구할 수 있다.

본 연구에서는 이와같은  $K_0$ 값을 구하기 위하여 수평응력 측정장치를 압밀시험방법으로 개발하였다.

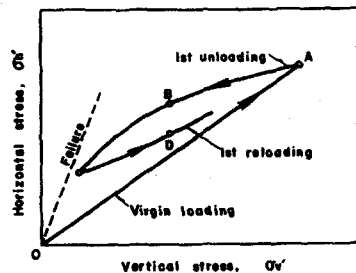


Fig. 1.1 Typical stress path of soils under  $K_0$  conditions

## 2. 기존의 실내 $K_0$ - 시험기

$K_0$ -실험 결과의 신뢰성을 입증하기 위해서는 실험방법에 대한 고찰이 필요하다.

$K_0$ -시험은 많은 연구자들에 의하여 시험장치의

고안과 함께 수행되었는데, 크게는 삼축압축시험기와 압밀시험기의 형태로 분류할 수 있다.

$K_0$ 상태하에서 수평응력을 측정하기 위한 삼축시험은 Fig. 2.1 (a)와 같이 수평변위 감지기를 이용하여 시료의 측면에서 수평변위를 직접 측정하는 방법과 시료의 측면위와 체적변위를 동시에 측정하여 측면변위의 평균치를 간접적으로 제어하는 두가지 유형으로 구분된다. 전자의 경우에 수평감지기는 LVDT(linear variable differential transformer) 변형감지기, 변형계이지(strain gauge) 등을 사용하여 Bishop & Henkel<sup>4)</sup>, Skempton & Sowa<sup>5)</sup>, Henkel & Sowa<sup>6)</sup>, Akai & Adachi<sup>7)</sup>, Nakase et al<sup>8)</sup>, Menzies et al<sup>9)</sup>, Konishi et al<sup>10)</sup>, Brown et al<sup>11)</sup>, Daramola<sup>12)</sup>, Al-Hussaini<sup>13)</sup>, Feda<sup>14)</sup> 등에 의하여 수행되었다.

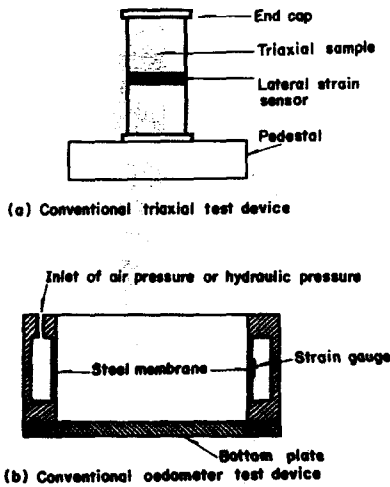


Fig. 2.1 Schematic representations of existing  $K_0$ -test apparatus

이 방법에 의하여 측정된 변위는 시료의 전체길이에 대해 변위가 균등하지 않을 때 횡방향 변위의 평균값으로 대표될 수 없으며, 또한 멤브레인(membrane)의 외측에서 측정된 변위이므로 멤브레인 내측에 있는 흙입자의 변위와 일치한다고 할 수 없는 단점이 있다<sup>15)</sup>.

후자의 경우는 시료를 포화시켰을 때 주로 사용하였던 방법으로 Bjerrum et al<sup>16)</sup>, Saada<sup>17)</sup>,

Lewin<sup>18)</sup>, Mitachi & Kitago<sup>19)</sup>, Hanzawa<sup>20)</sup>, Lo & Chu<sup>21)</sup> 등에 의하여 수행되었다.

이 방법에서는 측면변위를 자동적으로 계산하여 조절하지 않는다면  $K_0$ 상태를 유지하기 어려우며 또한 각 하중단계에서 압밀에 의해 유발되는 변위를 조절하기 위하여 재압축해야 하는 결점이 있다.

최근에 Hsieh<sup>22)</sup>는 완전배수상태에서 체적변형이 압밀시험에서의 측면형과 같도록 측압을 조절하여  $K_0$ -삼축압축시험을 수행한 Bishop & Eldin<sup>23)</sup>의 방법을 개량한 것으로, 컴퓨터를 사용하여 체적변형의 계산과 측압의 조절을 신속히 처리하였다. 그러나 이와 같이 개선된 방법에도 불구하고 위에서 언급한 결점 이외에도 시료가 접하는 하중판에서의 마찰은 전시료에 걸쳐 불균등한 변형을 일으키는 결점이 있다.

한편으로, 삼축시험에서 이중셀(double cell)을 사용하여  $K_0$ -시험을 수행한 Bishop et al<sup>24)</sup>의 방법과 이것을 개선한 Okochi & Tatsuoka<sup>25)</sup>의 방법이 있다. 이 두 방법의 차이는 시료와 내부셀(inner cell) 사이의 압력 및 내부셀과 외부셀 사이의 압력이 일정하도록 하여 측면변형이 없도록 조절하는 기법의 차이로서, 전자는 합금으로 된 침(needle)을 사용하여 전기적으로 내부공간에 채워진 수은의 변위를 측정 및 조절하였으며, 후자는 차압계(differential pressure transducer)를 사용하였다. 그러나 이처럼 정교한 방법을 사용하였음에도 불구하고 시료의 불균등한 변형의 존재를 감지할 수 없을 것이다.

$K_0$ -시험을 하기 위한 가장 편리하고 간단한 방법은 압밀링의 측면에 계기를 부착하여 수평응력을 직접측정하는 방법이다. Fig. 2.1 (b)와 같은 계기의 부착 및 측정방법을 다르게 하여 Brooker & Irland<sup>2)</sup>, Singh et al<sup>26)</sup>, Saxena et al<sup>27)</sup>, Ofer<sup>28,29,30,31)</sup>, Ou<sup>32)</sup> 등이  $K_0$ -시험을 수행하였다. 이 방법의 결점은 압밀링의 벽면마찰과 측벽의 변위로 인하여  $K_0$ 값에 다소 영향을 미친다는 것이다. 이와 다른 형태인 Campanella & Vaid<sup>33)</sup> 방법은 시료와 셀(cell) 사이에 물을 채워서 수평변위가 발생하지 않도록 제어하는 것으로서, 포화점토에 한정된 시험법이다.

### 3. $K_0$ 시험의 문제점

제하(unloading)에 의한 잔류응력(residual stress)의 산출은 응력이력(stress history)이 충분히 고려된 정교하고 간편한 이력모형(hysteretic model)이 필요하지만 이를 위한 반복제하-재하  $K_0$ 시험결과는 상당히 제한되어 있다.

기존의 이력모형은 Rowe<sup>34)</sup>에 의한 2방향 직접전단시험에서 제하에 따르는 수평응력의 감소가 무시될 수 있었다는 결과에 의한 것이다.

그 후 정지상태에서 응력이력에 따른 수평응력을 관찰하기 위하여 삼축압축시험(triaxial compression test)과 압밀시험(consolidation test)이 이용되었다. 이 두 가지 시험방법 중 거친재료는 삼축압축시험기를 사용해도 좋으나 부드러운 조립자는 가능한 압밀형태의 시험기를 사용하는 것이 바람직하다. 정지상태에서 수평응력을 측정하기 위한 삼축압축시험은 Wright<sup>35)</sup>, Edil & Dhowian<sup>36)</sup>, Bishop<sup>37)</sup>, Campanell & Vaid<sup>38)</sup>, Al-Hussaini<sup>13)</sup>, Feda<sup>14)</sup>, Hsieh<sup>22)</sup> 등에 의해 수행되었으나, 시료의 상하부에 접하고 있는 하중판의 마찰저항 때문에 시료내의 응력 분포 및 변형이 불균등하게 되는 문제점을 가지고 있다.

압밀시험방법에서는 Ofer<sup>30)</sup>, Hendron<sup>38)</sup>, Brooker & Ireland<sup>2)</sup> 등에 의해서 수행되었으나 수평응력 측정구조를 제외하면 대개 비슷하였다.

압밀시험기에 의한 수평응력의 측정을 위해서는 수평변위가 0이 되어야 하는 조건과 벽면의 마찰저항, 로드셀(load cell)의 항복(yielding), 그리고 응력경감 등을 고려해야하는 문제점이 있다.

만약 압밀시험의 문제점을 보완한다고 하더라도 수평응력을 측정하기 위해서는 미세한 수평변위는 허용해야만 하는 단점이 있으며, 이것이 다음 측압의 결정에도 영향을 미친다.

최근 Ou는 이와같은 영향을 극소화할 수 있도록 특별히 고안한, 수은을 채운 새로운 압밀시험기(new mercury-filled  $K_0$ -oedometer)를 사용하여 실험하였으며, Seed & Duncan<sup>39)</sup>의 해석방법을 근거로하여, 이력모형의 수정 및 매개상수의 결정과 구조물에 대한 비선형 모형을 제안하였으나 결과적으로 Ou에 의한 해석은 Seed & Duncan<sup>39)</sup>의 결

과와 비슷하였다.

지금까지 정지토압계수( $K_0$ )를 구하기 위한 측면토압측정장치는 삼축압축시험기와 압밀시험기를 이용한 두 가지 방법이 주로 사용되어 왔다,

그러나 현존하는  $K_0$ 시험기가 재하상태에서 신뢰할 수 있는 실내시험을 수행하기 위해서는 다음과 같은 세 가지 조건을 만족시켜야 한다.

- 가. 흙 시료는 재하방향인 연직방향으로 자유롭게 변형되어야 하며,
- 나. 모든 점에서 흙 시료의 측면변형은 없어야 하고,
- 다. 시험중에 연직 및 수평방향의 응력이 주응력이 될 수 있도록 시료의 경계에서 측면마찰이 없도록 해야 한다.

측면응력의 측정에서 삼축압축시험기 사용에 대한 일반적인 사항은 0측면 변형상태를 측압으로 유지하고, 시료의 측면변형을 측정하는 다른 구체적인 연구가 없으면, 정확한 정지토압계수( $K_0$ )를 측정할 수가 없다.

또한  $K_0$  압밀시험장치의 기본설계도 다른 일반적인 측압측정구조와 고의 비슷하며, 어떠한 경우에도 시험방법과 종합적인 측정구조는 위의 세 가지 요구조건을 만족시켜야 한다.

적어도 재래식 삼축압축시험장치를 이용할 경우 시험시료의 측면변형감지에 대한 세 가지 요구조건에 접근할 수 있는 적합한 구조를 개발해야 한다.

지금까지는 Fig. 2.1(a)와 같이 시료의 중간높이에 LVDT(linear varying differential transformers) 변형감지기(strain sensor)와 변형측정기(strain gauge)등, 측면감지장치를 간단히 부착하여 사용하는 삼축압축시험기의 형태가 가장 많다.

Hsieh는 셀(cell)의 압력적용과 체적변화계산을 빨리하기 위하여 디지털 컴퓨터(digital computer)를 사용하여 Bishop과 Eldin<sup>23)</sup>의 방법을 확장시켰다. 이는 종래의 방법보다 더 정확한 결과와 이상적인 0값으로 인해, 측면변형에 대한 오차는 아주 적게 나타났다.

그러나 삼축압축시험에서는 시료의 윗 뚜껑과 바닥판에서 마찰이 일어나므로 전체 시료에 대해 일정하지 않은 변형이 생기는 결함이 있다.

따라서 삼축압축시험장치에 의한 측압의 측정보

다 결함이 적은 압밀시험장치에 의한 측면변형이 더 일정하므로 보다 정확한 0측면변형상태를 유지할 수 있다.

그러나  $K_0$ 값을 측정할 때는 시료의 측면마찰에 대한 영향을 평가해야 한다. 측면응력의 감지를 위해 압밀링(oedometer ring)의 벽에 변형 측정기(strain gauge)를 부착한  $K_0$ 압밀시험기가 대부분이다.(Fig. 2.1b)

측압은 측하중이 압밀시험기에서 흙 시료를 둘러싼 얇은 철재막(steel membrane)의 변형에 의해 감지된다. 이 구조는 무시할 수 있는 정도의 적은 변위도 일어나지 않게 하기 위하여, 시료 주위의 원통형 방(annular chamber)에서 공기압이나 수압으로 조절하여 측면변형을 가능한 최소화시킨다. 그러나 측압측정시험에서는 아주 작은 측면변형은 부득이 인정할 수 밖에 없다.

#### 4. 새로운 $K_0$ 압밀시험장치

##### 1) 재하장치

재하장치는 개발되어 있는 Norway Geonor 사의 일정변위 압밀시험(constant ratio of strain consolidation test : CRSC test)장치를 사용하고 그 생김새는 Fig. 4.1과 같다.

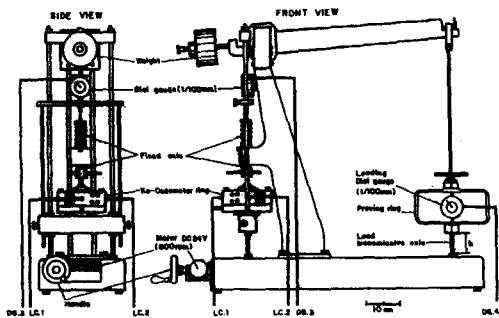


Fig. 4.1 Oedometer and swelling test equipment

##### 2) $K_0$ 압밀시험기

본 연구를 통해 만든 새로운  $K_0$ 압밀시험기(new  $K_0$ -oedometer ; Fig. 4.2, Fig. 4.3)는 표준압밀시험기(standard oedometer, D:6cm, H:2cm)와 같은 크기

로 만들고 시험기의 평면  $x$ 와  $y$ 축에 각각 로드셀(load cell ; W:2cm, H:1.5cm, A:3cm) 두 개를 설치(Fig. 4.4, Fig. 4.5)하여 측정결과를 서로 비교, 또는 유사시에 다른 하나를 사용할 수 있도록 하였다.

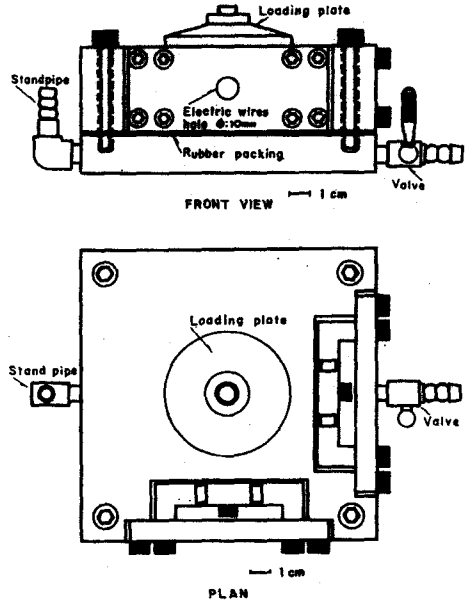


Fig. 4.2 Schematic of modified  $K_0$ -oedometer ring

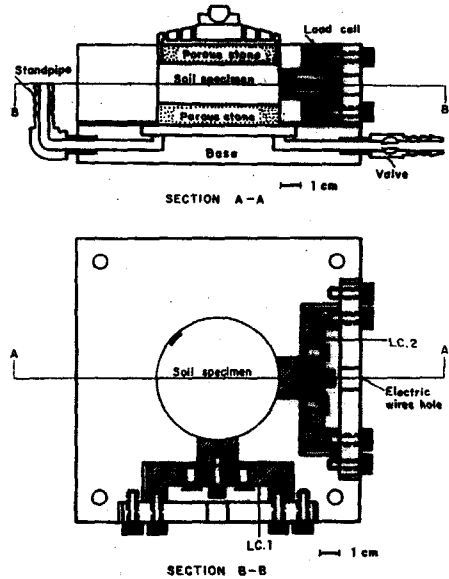


Fig. 4.3 Schematic of modified  $K_0$ -oedometer ring

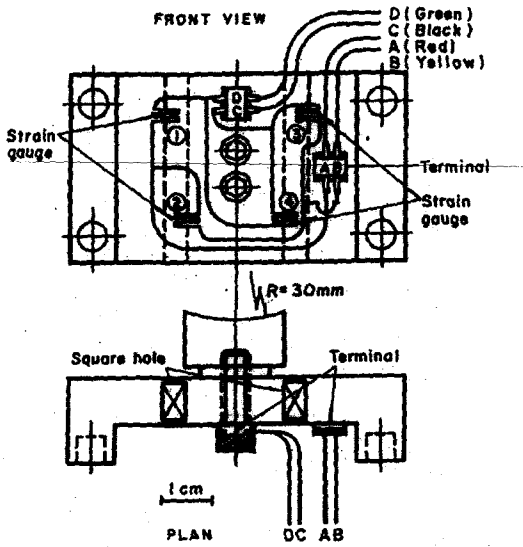


Fig. 4.4 Load cell

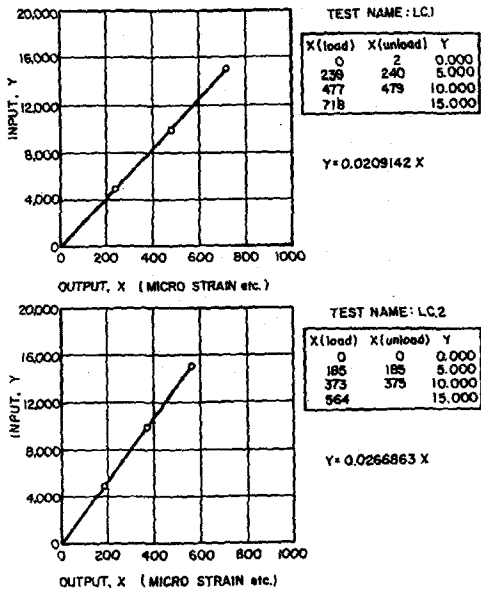


Fig. 4.5 Result of calibration for normal force of load cell

시험기의 재질은 표면처리와 녹이 쓰는 것을 방지하기 위해 스테인리스 스틸(stainless steel)로 방전 가공(electrical discharge machining) 하였다.

로드셀에 부착한 스트레인 게이지(strain gauge ; Fig. 4.6)의 제원은 Table-3.1에 표시하였으며, 그 회로도(circuit diagram)는 Fig. 4.7와 같다.

Table 3.1 Strain gauge factor

manufacturer	Kyowa Electronic Instrument Co., Ltd	
lot No.	Y2092 - 819	
type	KFC - 1 - C1 - 11	
gauge length	1mm	
gauge resistance	$Q119.8 \pm 0.2$	
gauge factor	$2.15 \pm 1\%$	
thermal out put	$\pm 1.8 \mu \epsilon / ^\circ C$	
gauge factor change with temperature	0.015%/ $^\circ C$	
adoptable temal expansion	10.8 ppm/ $^\circ C$	

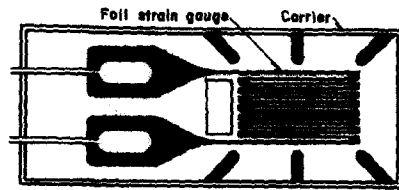


Fig. 4.6 Bonded foil electrical resistance strain gauge

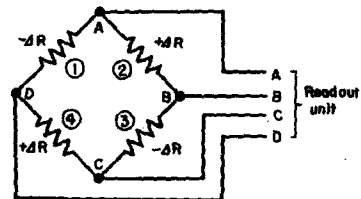


Fig. 4.7 Circuit diagram

### 3) Comparator box

공시체에 재하,재하, 재 재하 그리고 다주기 재하(cyclic loading)를 할 수 있는 제어장치(control device)로서 제어판(control pannel)의 모양은 Fig. 4.8과 같다.

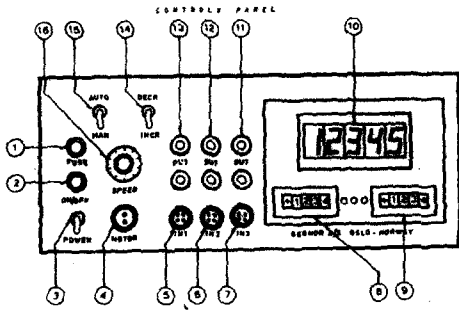


Fig. 4.8 Comparater box

- ① fuse ② on/off switch ③ power switch
- ④ motor connection
- ⑤⑥⑦ input for load, displacement and pore water pressure transducers
- ⑧⑨ comparater's low and high limits
- ⑩ comparater display
- ⑪⑫⑬ transducer outputs
- ⑭ increase or decrease of load
- ⑮ automatic or manual operation
- ⑯ motor speed control

4) personal computer와 plotter

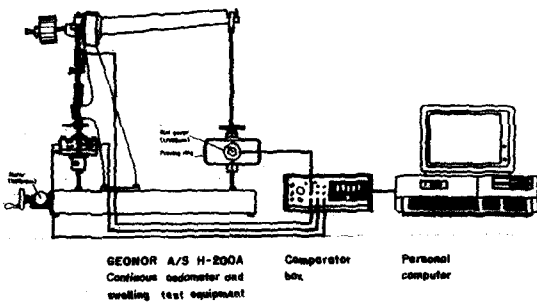


Fig. 4.9 System of measurement and data output apparatus.

결 론

본 연구에서는 정지토압계수를 측정하기 위한 장치들 중에서  $K_0$ 압밀시험기에 의한 방법을 사용하여 시험기를 개발하였다.

지금까지 사용되어온  $K_0$ 압밀시험기들은 시료의 측압을 측정하기 위해 시험기 ring의 측벽을 얇게 깎고 그 공간(chamber)에 수은이나 물을 채워 시료의 측압과 함께 유지시키면서 그때의 액압을 측

정하는 방법을 사용했다. 그러나 액압을 자동적으로 시료의 측압과 같게하는 장치들이 매우 복잡하고, 제작에 어려움도 많고, 경비도 많이 든다.

이에 반해 새로 개발한  $K_0$ 압밀시험기(new  $K_0$ -oedometer)는 실제로 시료에 작용하는 측압보다 더 많은 압력을 받을 수 있는 로드셀(load cell)을 사용하였기 때문에 시료의 측압에 의한 변형이 거의 없으며, 그 밖에 다른 부속장치가 적어 측정 작업이 용이하고 경비도 적게 든다.

참고문헌

- 1) Jáky, J., "The coefficient of Earth Pressure at Rest," Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers, Budapest, Hungary, pp.355-358, 1944
- 2) Brooker, E. W. and H. O. Ireland, "Earth Pressure at Related to stress History," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 11, No. 1, pp.1-15, 1965
- 3) Alpan, J., "The Empirical Evaluation of the Coefficient  $K_0$  and  $K_{or}$ ," Soils and Foundations, 7, (1), pp.31-40, 1967
- 4) Bishop, A. W. and D. J. Henkel, "The measurement of Soil Properties in the Triaxial Test," Arnold, London, 1957.
- 5) Skempton, A.W. and V. A. Sowa, "The Behavior of Saturated Clays During Sampling and Testing," Geotechnique, Institute of Civil Engineers, London, England, Vol.13, No.4, pp. 269-290, 1963
- 6) Henkel, D. J. and V. Sowa, "The Influence of Stress History on Stress Paths in Undrained Triaxial Test on Clay," Laboratory
- 7) Akai, K. and T. Adachi, "Study on the One-Dimensional Consolidation and Shear Strength Characteristics of Fully Saturated Clay," Proceedings of 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, Montreal, Canada, pp.146-150, 1965

- 8) Nakase, A., M. Kishi and M. Katsuno, "Triaxial Compression Test on Soil (1st report)," Report of the Port and Harbor Research Instrument, Vol.4, No.1, pp.1-27, 1965
- 9) Menzies, B. K, H. Sutton and R. E. Davides, "A New System for Automatically Simulating  $K_0$  Consolidation and Swelling in Conventional Triaxial Cell," Geotechnique Vol.27, No.4, pp.593-596, 1977
- 10) Konishi, J. and S. Hirai, "The  $K_0$ -Values of Sand in Triaxial Compression Apparatus," Proceedings, 15th Annual Symposium on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1980
- 11) Brown, S. F. and M. S. Snaith, "The Measurement of Recoverable and Irrecoverable Deformation of the Repeated Load Triaxial Test," Geotechnique Vol.24, No.2, pp.255-259, 1974
- 12) Daramola, O., "On Estimating  $K_0$  for Overconsolidated Granular Soils," Geotechnique, Institute of Civil Engineering, London, England, Vol.30, No.3, pp.310-313, 1980
- 13) Al-Hussaini, M. M., "Comparison of Various Methods for Determining  $K_0$ ," Laboratory Shear Strength of Soil, ASTM STP 740, pp. 78-93, 1981
- 14) Fedaa, J., " $K_0$ -Coefficient of Sand in Triaxial Apparatus," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.110, No.4, pp.519-524, 1984
- 15) Okochi, Y. and Tatsuoka, F., "Some Factors Affecting  $K_0$ -Values of Sand Measured in Triaxial Cell," Soil and Foundations, Vol.24, No.3, pp.52-68, 1984.
- 16) Bjerrum, L. and K. H. Andersen, "In-Situ Measurement of Lateral Pressures in Clay," Proceedings, 5th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Madrid, Vol.1, pp.11-20, 1972
- 17) Saada, A. S., "One-dimensional Consolidation in Triaxial Cell," Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, Proceedings of ASCE, Vol.96, No.SM3, pp.1085-1089, 1970
- 18) Lewin, P. I., "Use of Servo Mechanism for Volume Change Measurement and  $K_0$  Consolidation," Geotechnique, Vol.21, No.3, pp.259-262, 1971
- 19) Mitachi, T. and S. Kitago, "Change in Undrained Strength Characteristics of a Saturated Remolded Clay due to Swelling," Soil and Foundation, Vol.16, No.1, pp.45-58, 1976
- 20) Hanzawa, H., "Geotechnical Properties of Normally Consolidated Fao Clay," Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo Japan, Vol.17, pp.1-15, 1977.
- 21) Lo, S-C. R. and J. Chu, "The Measurement of  $K_0$  by Triaxial Strain Path Testing," Soil and Foundations, Vol.31, No.2, pp.181-187, 1991
- 22) Hsieh, H., "An Automated Triaxial Device for Measuring the At-Rest Earth pressure Coefficient," Engineer's Degree Thesis, Department of Civil Engineering, Stanford University, 1985
- 23) Bishop, A. W. and A. K. G. Eldin, "The Effect of Stress history on the relation between  $\phi$  and Porosity in Sand." Proceedings, 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, pp.100-105, 1953
- 24) Bishop, A. W., D. L. Webb and A. E. Skinner, "Triaxial Test on Soil at Elevated Cell Pressures," Proceedings, 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tronto, Vol.2, pp.170-174, 1965
- 25) Okochi, Y. and F. Tatsuoka, "Some Factors Affecting  $K_0$ -Values of Sand Measures in Triaxial Cell," Soil and Foundations, Vol.24, No.#, pp.52-68, 1984



- 26) Singh, H., D. J. Henkel and D. A. Sangrey, "Shear and  $K_0$  Swelling of Overconsolidated Clay," Proceedings, 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1.2, Moscow, U. S. S. R., pp.367-376, 1973
- 27) Saxena, S., J. Hedberg and C. C. Ladd, "Geotechnical Properties of Hackensack Valley Varved Clays of N. J., ASTM Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 1, No.3, pp.148-161, 1978
- 28) Ofer, Z., "Instruments for Laboratory and In Situ Measurement of the Lateral Swelling Pressure and Swelling Pressure of Expansive Clays," Proceedings, 4th International Conference on Expansive Soils, Denver, USA, pp.45-53, 1981
- 29) Ofer, Z., "Laboratory Instrument for Measuring the Lateral Soil Pressure and Swelling Pressure, ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol.4, No.4, pp.177-182, 1981, 1982
- 30) Ofer, Z., "Laboratory  $K_0$  Testing of Cohesionless Soil," The Civil Engineering in South Africa, Vol.24, No.10, pp.533-545, 1982
- 31) Ofer, Z., "Laboratory Determination of  $K_0$  and Comparison with Prototype Silo Observations," 4th Australia-Zealand Conference on Geomechanics, Perth, pp.14-18, 1984
- 32) Ou, Chang-Yu, "Finite Element Analysis of Compaction-Induced Stresses and Deformation," Ph. D. Thesis, Stanford University, 1988
- 33) Campanella, R. G. and Y. P. Vaid, "A Simple  $K_0$  Triaxial Cell," Canadian Geotechnical Journal, Vol.9, No.3, pp.249-260, 1972
- 34) Rowe, P. W., "A Stress-Strain Theory for Cohesionless Soil with Applications to Earth Pressures at Rest and Moving Walls," Geotechnique 4, No.2, 1954, pp.70-88
- 35) Wright, S. G., "A Study of Slope Stability and Undrained Shear Strength of Clay Shales," Ph. D. Thesis, University of California at Berkely, 1969
- 36) Edil, T. B. and A. W. Dhowian, "At-Rest Lateral Pressure of Peat Soils," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE. Vol.107. No.GT2. Feb., pp.201-220, 1981
- 37) Bishop, A. W., "Test Requirements Measuring the Coefficient of Earth Pressure at Rest," Conference on Earth Pressure Problems, Brussels, Vol.1, pp.2-14, 1958
- 38) Hendron, A. J., and M. T. Davisson, "Static and Dynamic Behavior of a Playa Silt in One-Dimensional Compression," Report on Contract AF 29, 601-63-5577 of the Soil Mechanics and Foundation Division, Department of Civil Engineering, University of Illinois, 1963
- 39) Seed, R. B. and J. M. Duncan, "Finite Element Analysis : Compaction-Induced Stresses and Deformation," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 112(1), pp.23-43, 1986