

새롭게 개발된 스크류재하시험장치를 이용한 지반특성 파악

Evaluation of Ground Characteristic Using the New Developed Screw Plate Load Test Device

이 남 우¹ Lee, Nam-Woo

황 응 기² Hwang, Woong-Ki

최 용 규³ Choi, Yongkyu

김 태 형⁴ Kim, Tae-Hyung

Abstract

Sampling disturbance can often introduce considerable errors in the laboratory estimation of geotechnical properties of soils. Accordingly, it causes inappropriate results in analysing field behavior. Therefore, a screw plate load test, one of in-situ test technique, is developed in this study, because in-situ testing techniques have advantages for the estimation of reliable geotechnical parameters. The screw plate load test, which was modified from the plate load test, conducts an experiment underneath ground by inserting a spiral type of auger screw. In this study, the structure and characteristics of the screw plate load test device are introduced in detail and the reliability of the device is examined through the analysis of the laboratory test results.

요 지

실내시험의 경우 샘플링으로 인한 시료의 교란은 종종 지반의 공학적 특성을 추정하는데 상당한 오차를 발생시키기 때문에 현장지반의 거동을 분석하는데 있어 부적절한 결과를 초래한다. 따라서 본 연구에서는 원위치시험법 중 하나인 스크류재하시험을 개발하였다. 그 이유는 신뢰성 있는 공학적 파라미터를 산정하기 위해서는 원위치시험법을 채택하는 것이 유리하기 때문이다. 스크류재하시험은 나선형의 오거 재하판을 지반 속에 관입하여 재하시험을 하는 평판 재하시험의 개량된 시험이다. 본 연구를 통해 스크류시험장치에 대한 구조와 특성을 자세히 소개하고 실내시험 결과를 통해 장치에 대한 신뢰성을 검증하였다.

Keywords : Field behavior, In-situ test, Screw plate load test, Soil disturbance, Soil properties

1. 서 론

토목구조물 시공 중 지반과 관련이 되는 많은 위험요소가 존재하는데 이와 같은 지반의 특성을 제대로 이해하지 못하고 시공을 하는 경우 상당한 위험이 따를 수 있다. 또한, 기초의 붕괴, 시공지연, 공사비용의 초과

등은 지반의 성질을 잘 파악하지 못하거나 부적절한 지반조사의 결과로 인해 기인되는 경우가 상당히 많다.

지반조사에 대한 관심 및 중요성은 나날이 증가하고 있다. 일반적으로, 지반의 특성 및 토질 정수를 산출하기 위한 여러 종류의 현장역학시험과 실내시험이 실시되어지고 있지만 주로 현장역학시험을 선호하고 있는

1 학생회원, 한국해양대학교 토목환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environment Engrg., Korea Maritime Univ.)

2 학생회원, 한국해양대학교 토목환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environment Engrg., Korea Maritime Univ.)

3 정회원, 경성대학교 건설·환경공학부 교수 (Member, Prof., Div. of Civil and Environmental Engrg., Kyungung Univ.)

4 정회원, 한국해양대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Korea Maritime Univ., kth67399@hhu.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

추세이다. 그 이유는 샘플링으로 인한 시료의 교란은 일반적으로 흙의 특성을 알기 위한 실내시험에서 오차를 발생시킬 수 있다고 알려져 있기 때문이다(Bergado and Huan, 1987). 따라서 정교한 샘플링과 세심히 주의를 기울인 실내시험에서 얻은 결과조차도 현장의 지반 거동과는 차이가 있을 수 있다. 즉, 현장 지반의 공학적 변수 추정을 위해서는 원위치시험기술을 채택하는 것이 일반적으로 유리하다는 것을 의미한다. 원위치시험인 현장역학시험에는 현재까지 지반조사에서 가장 많이 적용되고 있는 표준관입시험(SPT)이 있고, 그 외에 콘관입시험(CPT), 베인시험(VT), 딜레토미터시험(DMT), 평판재하시험(PBT), 공내수평재하시험(PMT) 등이 있다. 정확히 본 연구에서는 지반의 교란을 최소화하며 지반의 거동을 분석할 수 있는 새로운 시험방법 등에 대해 연구가 되었다.

스크류재하시험은 현장에서 점성토와 비점성토의 지반공학적 특성 측정을 위하여 활용되어진 전통적인 평판재하시험의 개량된 장치이다. 스크류재하시험과 관련된 현재까지의 연구동향을 살펴보았을 때(Kummeneje and Eide, 1961; Gould, 1967; Schmertmann, 1970; Janbu and Senneset, 1973; Dahlberg, 1975; Selvadurai et al., 1980; Kay and Avasle, 1982; Huan, 1986; Bergado and Huan, 1987), 기존 스크류재하시험은 주로 육상에서 이루어졌으며, 대부분 스크류재하시험에 이용된 재하판의 직경(주로 160~350mm)은 평판재하시험에 사용되는 재하판의 직경(주로 300~450mm)과 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 육상 및 해상에서도 시공성과 경제성을 갖춘 스크류재하시험이 이루어질 수 있도록 하기 위해 일반적으로 많이 쓰이는 케이싱(NX, 내경 81mm, 외경 83.9mm)을 기준으로 재하판의 직경을 75mm로 조절하였다. 또한 기존 시험장치에 비해 부피 및 무게를 크게 간소화시켜 이동성을 높였다.

따라서, 본 연구에서는 시공성, 경제성 및 이동성면에

서 큰 장점을 가지고 있는 새로운 스크류재하시험장치의 기본적인 구조 메카니즘과 특징에 대해 소개하고, 실내시험을 통해 장치의 신뢰성을 확보하고자 한다.

2. 기존 스크류재하시험의 특징

스크류재하시험은 평판재하시험의 변형된 장치로 원위치의 사질토 및 점성토 지반의 공학적 특성의 측정에 사용되었다. 스크류재하시험은 개발 초기에 발파 영향으로 느슨해진 모래의 조밀도 변화를 조사하기 위한 현장시험장치로 고안되었다(Kummeneje and Eide, 1961). 그 후 사질토에 대한 스크류재하시험의 현장적용이 Gould(1967)에 의해 실시되었으며, Schmertmann(1970)와 Janbu and Senneset(1973)는 현장에서 사질토의 변형특성을 측정하기 위하여 스크류재하시험을 실시하였다. 또한, Dahlberg(1975)는 스크류재하시험을 사질토의 변형에 미치는 선행압축의 영향을 조사하기 위하여 사용되었으며 실트질 점토에 대한 시간 의존적 또는 비 의존적인 연구에 스크류재하시험도 진행되었다. 스크류재하시험이 점성토에 수행되었을 때, 변형과 강도 특성은 선행 탄성토과 이상적인 소성토과 같은 재료 거동을 간략화한 이론을 이용하여 산정하였다. Kay and Avasle(1982)는 지하선로 구축 지점에서 스크류재하시험을 실시하고 동일 지역에 대하여 프레스미터시험을 함께 수행하여 그 신뢰성을 확인하였다. Bergado and Huan(1987)은 연약한 점토에 대한 실내에서의 일축압축시험, UU 삼축시험, 그리고 일차원 압밀시험 뿐만 아니라, 현장에서의 베인전단시험과 공내재하시험에서의 결과와 스크류재하시험 결과와의 연관성을 검토하였다.

3. 새로 개발된 스크류재하시험장치

새롭게 개발한 스크류재하시험장치는 하중장치의 부



Fig. 1. Driven path of a screw plate in compacted kaolin (Selvadurai et al., 1980)

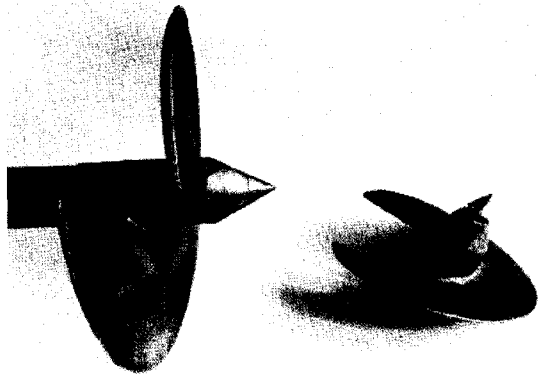


Fig. 2. Suitable proportions of the screw plate (Selvadurai et al., 1980)

Suitable ratio of screw plate,

$$c/a = 0.125$$

$$b/a = 0.25$$

$$t/a = 0.02$$

Where,

the diameter of the load shaft (2c)

the diameter of the screw plate (2a)

the thickness of the plate (t)

the pitch (2b)

피와 무게를 크게 간소화 시켜 이동성이 뛰어나고 육상이나 해상 설치가 용이하여 광범위한 범위에서 연약지반 조사와 공사비 절감을 기대할 수 있다. 특히, 스크류재하시험장치의 가장 큰 장점 중 하나는 시험 중 지반 교란을 적게 시킨다는 점이다. 다른 현장관입시험장치에서와 같이 스크류재하판도 흙 속에 관입되는 동안 주변 흙의 교란을 초래할 수 있지만 그 정도는 다른 시험에 비해 무시할 수 있을 정도로 매우 적다. 그림 1은 압축된 카이올린점토층 안으로 삽입된 스크류재하판을 나타낸 것으로 스크류재하시험에서 나선 모양 오거의 관입활동에 의한 흙의 교란은 크지 않다는 것을 알 수 있다(Selvadurai et al., 1980). 이러한 영향은 재하축의 직경(2c), 스크류판의 직경(2a), 스크류판의 두께(t), 스크류판의 피치(2b)를 적당한 비율로 조절함으로써 최소화될 수 있다(그림 2).

3.1 시험장치 구성

그림 3는 현재 새로 개발된 스크류재하시험기의 전체적인 모식도를 나타낸 것이다. 새로 개발된 스크류재하시험장치는 크게 스크류재하판 및 재하축, 유압실린더 장치, 하중재하장치, 하중제어 및 측정장치로 이루어져 있다. 각 장치에서 주요한 부분의 세부적인 형태와 특징은 다음과 같다.

3.1.1 스크류재하판 및 재하축

스크류재하판은 그림 4와 같이 지름 75mm, 두께 1mm, 18mm의 피치를 가진 1회전의 나선형 오거로 되어 있다. 스크류재하판의 지름은 시공성과 공사비 절감을 위해 일반적으로 많이 쓰이는 케이싱(NX, 내경 81mm, 외경 83.9mm)을 기준으로 하였으며, 하중을 전달하는 재하축은 스크류재하판에 연결되어 있는 지름 10mm의 강철봉으로 되어 있다. 여기서, 재하축의 직경 (2c), 스크류재하판의 직경(2a), 판의 두께(t), 피치(2b)의 비율은 $c/a=0.133$, $b/a=0.24$, $t/a=0.026$ 으로, 앞서 언급한 바와 같이 기존의 시험적 연구(Selvadurai et al., 1980)를 통해 얻어진 스크류재하판의 적정 비율을 토대로 제작되어졌다. 스크류재하판의 형태와 비율은 재하판의 관입 활동 시 흙의 교란과 변형에 보다 큰 영향을 미치므로 제작 시 좀 더 많은 주의가 필요하다. 스크류재하판과 재하축은 탄성계수 $E = 2.1 \times 10^8 \text{kPa}$, 포아송비 $\nu = 0.28 \sim 0.3$ 인 강철로 제작되었고, 기존의 연구에서 사용되었던 스크류판에 적용된 재료(탄성계수 $E = 2.0 \times 10^8 \text{kPa}$, 포아송비 $\nu = 0.3$)의 특성과 큰 차이가 없다.

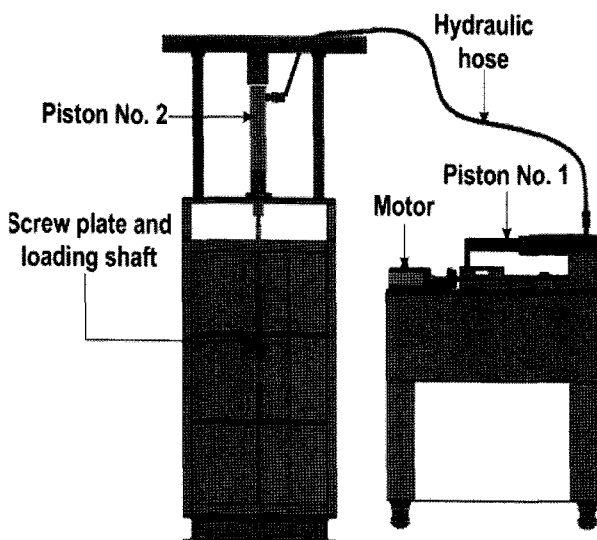


Fig. 3. Schematic diagram newly developed screw plate load test device

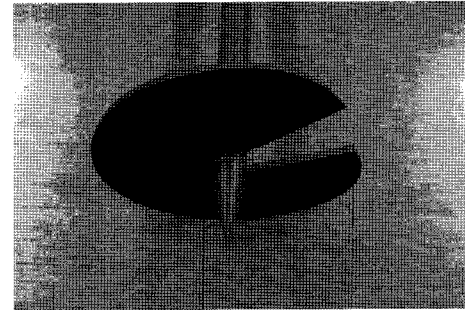
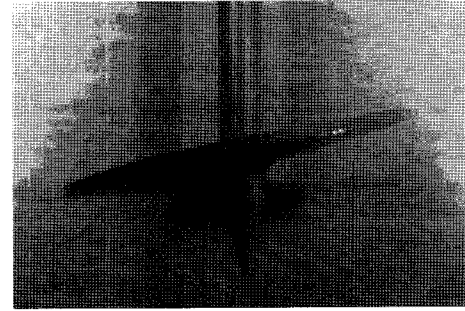
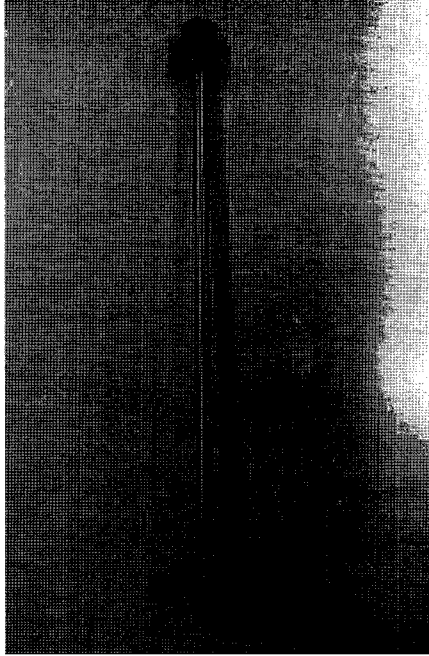
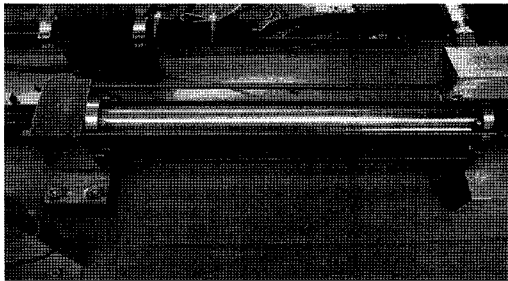
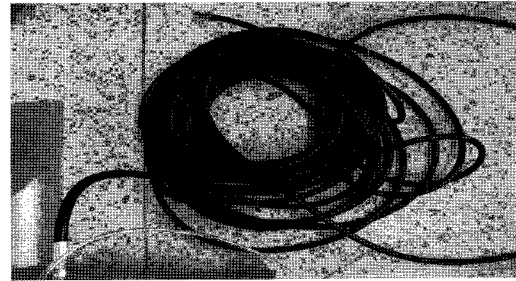


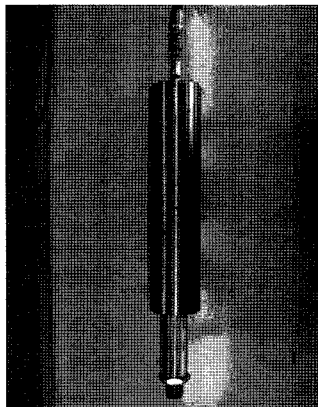
Fig. 4. Screw plate and load shaft



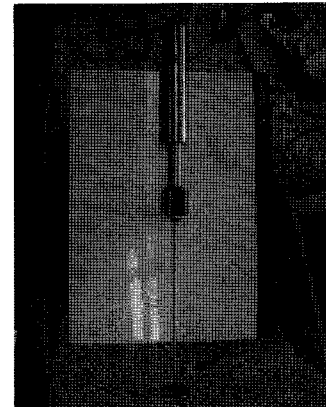
(a) No.1 cylinder



(b) Hydraulic hose



(c) No.2 cylinder



(d) Shape connected with screw plate

Fig. 5. Hydraulic cylinder apparatus

3.1.2 유압실린더장치

육상뿐만 아니라 해상에서도 지반조사를 용이하게 수행하고, 이동과 설치를 원활히 하기 위해서 하중재하 장치의 자중과 용적을 줄일 필요성이 있다. 따라서 그림 5와 같이 유압실린더장치를 고안 및 제작하게 되었으며

유압실린더장치는 1차 실린더, 유압호스, 2차 실린더로 구성되어 있다.

1차 실린더는 양쪽 방향에 각각 모터와 유압호스로 연결되어 있고, 내부는 최대 약 7MPa의 압력이 발생된다. 유압호스는 최대 약 10MPa 이상의 압력에 견디는 것을 사용

했기 때문에, 1차 실린더에서 발생된 압력을 충분히 2차 실린더로 전달 할 수 있다. 2차 실린더는 1차 실린더와 연결된 유압호스로 연결되어 있으며, 반대 방향은 그림 5(d)와 같이 스크류재하판 및 재하축과 연결되어 있다. 2차 실린더는 시추된 지반 속에 들어가게 되도록 제작 되어, 스크류재하판에 직접 하중을 전달하는 역할을 하게 된다.

3.1.3 하중재하장치

하중재하장치는 하중제어 및 측정장치에 의해 모터를 회전시켜 유압을 발생시키게 된다. 모터를 회전시켜 발생된 유압으로 최대 10kN의 하중을 스크류재하판에 전달할 수 있고, 최대 200mm의 변위를 측정할 수 있다. 발생된 유압과 변위는 1차 실린더에 설치된 압력게이지와 변위게이지에 의해 하중제어 및 측정장치로 실시간으로 전송되어진다.

3.1.4 하중제어 및 측정장치

하중제어 및 측정장치는 하중발생장치 및 유압실린

더장치를 신속하고 정밀하게 제어할 뿐만 아니라 데이터로거를 통해 측정된 하중이나 변위를 모니터 화면으로 전송하여 보다 편리하고 정확한 데이터를 얻을 수 있다.

3.2 작동 및 측정원리

3.2.1 작동원리

그림 6은 스크류재하시험장치의 작동원리 모식도로 2차 실린더 끝에 있는 스크류재하판을 회전시켜 지반에 고정시킨 후, 모터에서 발생된 압력이 1차 실린더, 유압호스, 2차 실린더, 스크류재하판으로 전달되어 하중 및 변위가 측정되어진다.

3.2.2 측정원리

지반에 가해지는 하중 측정 방법은 그림 7에서 보는 바와 같이 간략하게 설명될 수 있다. 우선, 모터의 회전에 의해 1차 피스톤을 전진시켜 유압을 발생시킨다. 여

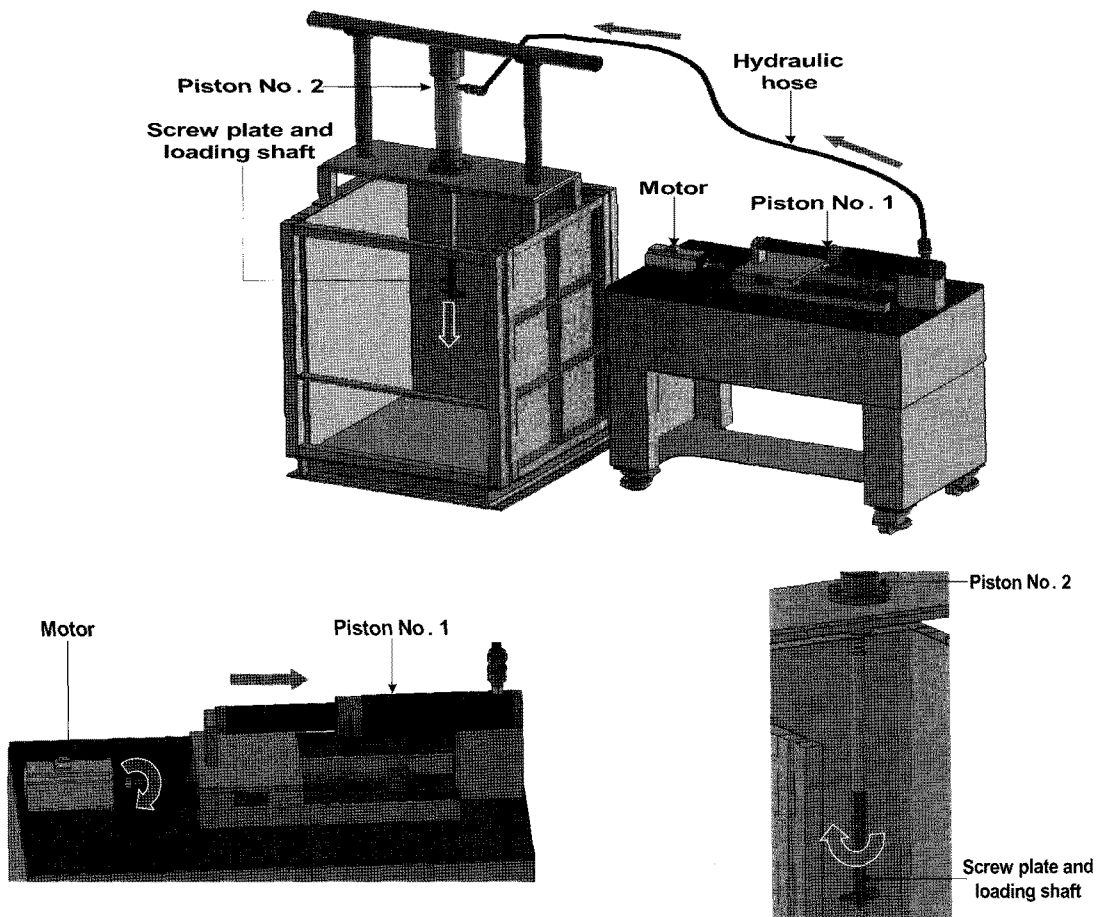


Fig. 6. Operation principle schematic diagram of the screw plate load test

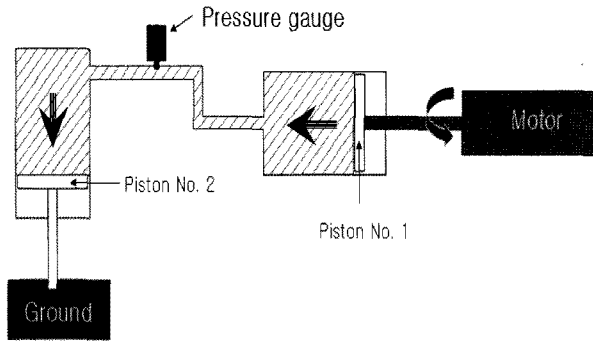


Fig. 7. Schematic diagram of load measurement

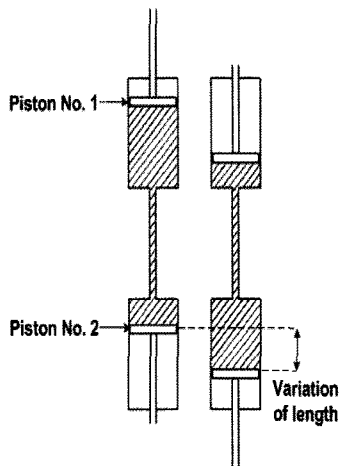


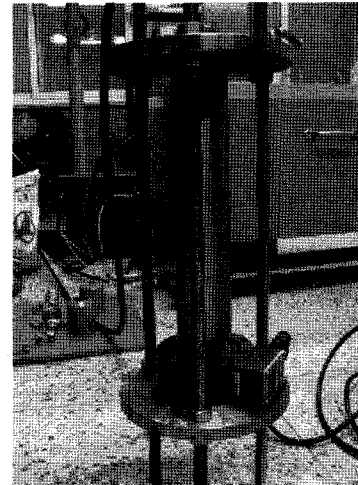
Fig. 8. Schematic diagram of displacement measurement

기서 발생한 유압은 2차 피스톤을 이동시키게 되고, 이때 밀어내려고 하는 유압과 밀리지 않으려고 하는 지층 사이의 힘을 측정할 수 있다. 발생한 하중은 유압 라인에 설치된 압력센서의 압력 값과 1차 실린더의 단면적의 곱으로 나타낼 수 있다. 변위는 그림 8과 같이 유체의 부피 변화량과 1차 및 2차 실린더의 단면적을 알고 있으므로 실린더가 하강할 때의 길이변화를 통해 측정할 수 있다.

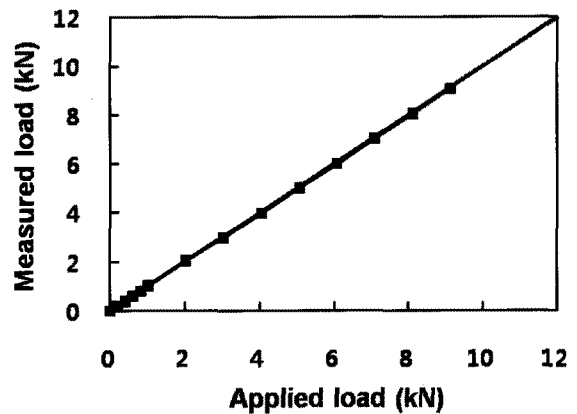
4. 스크류재하시험장치 보정

4.1 재하하중 보정

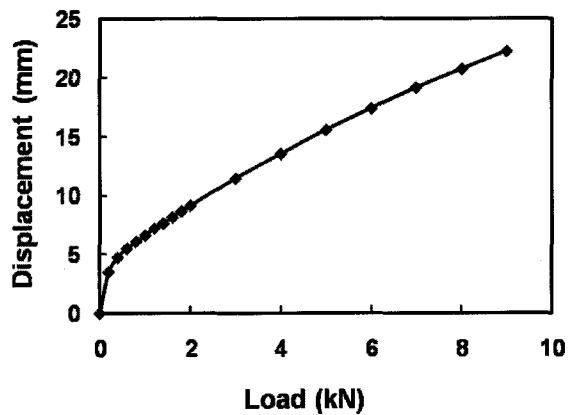
앞서 언급했듯이 재하하중은 유압실린더장치를 통해서 지반에 전달하게 된다. 장비의 특성상 1차 실린더에서 발생한 유압으로 재하하중을 측정하기 때문에 지반에 직접 하중을 전달하는 2차 실린더에 재하하중이 그대로 전달되는지 검증할 필요가 있다. 따라서 그림 9(a)와 같이 2차 실린더에서 스크류재하판과 결합하는 부분



(a) Test equipment



(b) Calibration of load



(c) Calibration of displacement

Fig. 9. Result of calibration test

에 로드셀을 부착하였다. 그리고 하중단계에 따라 하중을 재하하여 1차 실린더에서 측정된 재하하중과 로드셀에서 측정된 하중을 비교하였다. 그림 9(b)에서 보는 것과 같이 1차 실린더에서 측정한 재하하중과 로드셀에서 측정된 하중은 거의 일치하므로 재하하중은 지반에 정확하게 전달된다고 볼 수 있다.

4.2 변위 보정

새로 개발된 스크류재하시험장치는 특성상 지반의 변위를 직접 측정하기 어렵기 때문에 앞서 언급한 변위 측정 원리에 따라 1차 실린더에 발생한 변위를 이용하여 측정되도록 하였다. 따라서 정확한 지반의 침하량 산정을 위해서는 변위의 보정이 필요하다. 유압실린더장치에 의해 측정된 변위 중 가압에 사용된 변위를 분류해내기 위해 스크류재하판과 결합하는 부분에 변위를 억제시킨 다음 하중을 재하 하였다. 각 하중단계에서 기록되는 변위를 측정하여 가압에 사용된 변위보정값을 측정하였으며 각 하중단계에서 보정할 변위는 그림 9(c)와 같다.

4.3 재하축 좌굴 영향 검토

지반에 가하는 재하하중은 재하축을 통해 스크류재하판에 전달된다. 따라서 스크류재하시험장치의 재하축에 대한 좌굴 검토를 실시하여 재하하중이 정확히 지반에 전달되도록 설계해야 한다. 기둥이 하중을 받을 때 좌굴현상이 발생하기 전 최대로 받을 수 있는 하중을 임계하중이라 하며 식 (1)의 Euler 임계하중 공식을 이용하여 임계하중을 구할 수 있다.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (1)$$

여기서, P_{cr} = 임계하중

E = 탄성계수

I = 관성모멘트

L = 기둥의 길이

스크류재하축의 길이는 28cm, 탄성계수는 2.1×10^8 kN/㎡이므로 위의 식에 대해 계산하면 임계하중은 3.6kN이다. 본 시험에서는 하중 단계를 각각 0.2~1.2kN, 0.04~0.32kN으로 계획했으므로 재하축의 좌굴 현상이 재하하중에 미치는 영향은 없다고 볼 수 있다.

5. 실내시험 및 결과

5.1 실내시험

5.1.1 지반 재료 특성

재하하중을 일정하게 지반에 전달하기 위해서는 균질하게 형성된 지반이 필요하다. 이를 위해 입자크기 분포가 균등한 주문진표준사와 50kPa로 압밀시킨 부산신항점토를 이용하여 모형지반을 생성하였다. 주문진표준사 및 부산신항점토의 입도분포를 그림 10 및 그림 11에 나타내었으며, 2가지 시료의 물리적 특성은 표 1 및 표 2에 나타냈다.

5.1.2 지반 준비

본 시험에서 사용된 토조의 크기는 500(W)×500(L)×800(H)mm이다. 모래지반을 준비하는데 있어서 가장 중요한 것 중에 하나가 지반을 균질하게 형성시키는 것이기 때문에 모래의 자유낙하를 이용하는 강사법을 사용

Table 1. Properties of Joomunjin sand

Description	Symbol	Property
Specific gravity	G_s	2.612
Max. void ratio	e_{max}	0.912
Min. void ratio	e_{min}	0.619
$D_r=85\%$, void ratio	$e_{85\%}$	0.663
Max. dry density	γ_{dmax}	15.824N/cm ³
Min. dry density	γ_{dmin}	13.401N/cm ³
$D_r=85\%$, dry density	$\gamma_{d85\%}$	15.406N/cm ³
Effective particle size	D_{10}	0.413mm
D_{30} particle size	D_{30}	0.451mm
D_{60} particle size	D_{60}	0.492mm
Uniformity coefficient	C_u	1.191
Coefficient of curvature	C_c	1.001

Table 2. Properties of Busan newport clay

Description	Symbol	Property
Specific gravity	G_s	2.65
Wet density	γ_t	18.443N/cm ³
Dry density	γ_d	12.792N/cm ³
Effective particle size	D_{10}	0.0015mm
D_{30} particle size	D_{30}	0.009mm
D_{60} particle size	D_{60}	0.055mm
Uniformity coefficient	C_u	36.67
Coefficient of curvature	C_c	0.98
Moisture content	w	46.48%
Liquid limit	LL	48.57%
Plastic limit	PL	24.56%
Plasticity index	PI	24.01

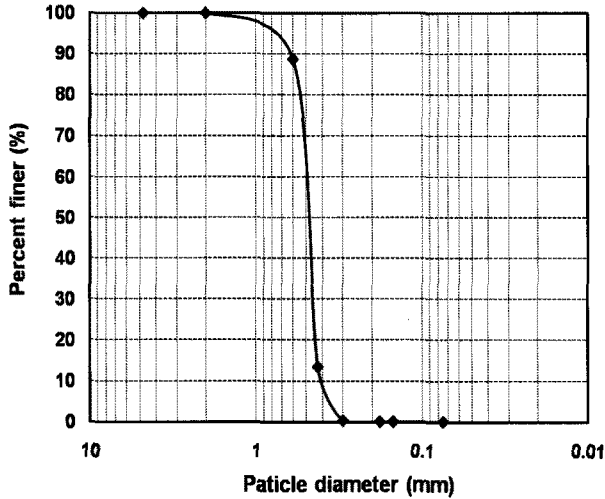


Fig. 10. Particle size distribution curve (Joomunjin sand)

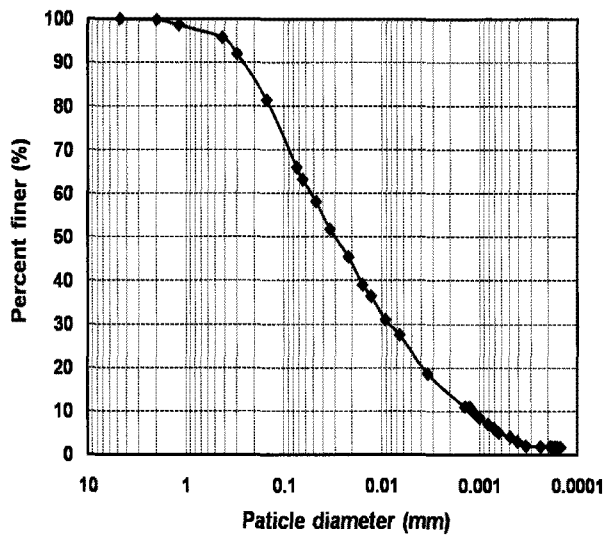


Fig. 11. Particle size distribution curve (Busan newport clay)

해 모래지반 형성을 계획하고 이를 충족시킬 수 있는 강사기를 이용, 상대밀도 85% 지반을 형성 하였다.

점토지반의 준비는 다음과 같다. 먼저 여과지와 약 20cm 두께의 모래를 토조 배수구 위에 위치시켜 점토의 압밀 시 배수를 허용하게 하였고 단계별로 하중을 재하하여 간극수를 소산시키며 하중이 지반에 고루 전달시킬 수 있도록 설계하였다. 소정의 지지력을 얻고자 약 1300kg의 하중을 토조에 가함으로서 50kPa로 압밀된 지반을 계획하였으며, 점토지반은 약 90일간의 장기간 하중을 가함으로서 이루어졌다.

5.1.3 시험방법

지반을 형성한 후 시험을 실시하기 전에 먼저 유압실린더장치 내부를 기름으로 가득 채우는 과정이 중요하

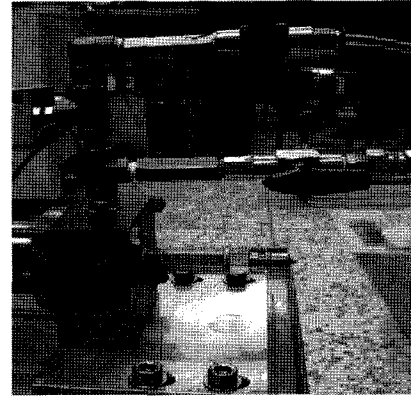


Fig. 12. Hydraulic hose

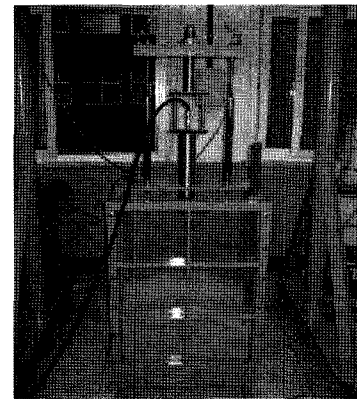


Fig. 13. Entire apparatus before the test

다. 앞서 측정원리에서 언급했듯이 본 시험에 사용되는 유압실린더장치는 하중과 변위를 측정하는데 직접적인 연관이 있기 때문에, 기름 속에 공기층이 존재하면 공기층의 큰 압축성으로 인해 정확한 압력을 전달할 수 없고, 변위 역시 정확하게 측정할 수 없게 된다. 그림 12는 1차 실린더 끝부분에 있는 3개의 유압 호스 라인을 보여 주는데 상단의 라인은 대기층과 연결되어 있고, 중간과 하단의 라인은 각각 2차 실린더와 연결되는 유압호스와 기름을 채우는 호스와 연결되어 있다. 유압실린더장치에 기름을 채우기 위해서 우선 1차 실린더 속에 있는 피스톤을 최대한 후진시킨다. 그리고 2차 실린더와 연결되는 유압호스 라인의 밸브를 잠그고, 대기층과 연결되는 호스라인의 밸브를 열어둔 후, 유압 펌프를 이용해 기름을 채운다. 기름은 밀도와 점성이 크기 때문에 상단의 대기층과 연결되어 있는 호스라인으로 기름이 나오게 되면 1차 실린더 속에는 기름이 가득 찬 걸로 볼 수 있다. 이와 반대로 2차 실린더와 연결되는 유압호스 라인의 밸브를 열고, 대기층과 연결되어 있는 호스라인의 밸브를 열어 기름을 채우면 2차 실린더와 연결되는 유압호스에 기름을 가득 채울 수 있다.

유압실린더장치 및 유압호스에 기름을 채운 후 스크류판 및 재하축과 연결된 2차 실린더를 토조에 연결되어 있는 관입장치에 연결하였다. 관입장치를 이용해 2차 실린더와 연결되어 있는 축을 회전시켜 모래지반 속으로 10cm 관입한 후, 1차 실린더와 연결되어 있는 유압호스를 2차 실린더와 연결하였다. 그림 13은 하중을 재하하기 전 시험 준비가 완료된 상태를 보여준다.

하중제어방식에서 하중은 계획 최대하중을 5~8단계로 등분으로 재하한다. 하중유지시간은 침하속도가 어느 일정 값 이하가 되고 침하진행이 사실상 정지했다고 간주할 할 수 있을 때(예로서 포장시험이 있고, 1분간의 침하량이 각 하중강도에 의한 단계에서 침하량의 1%이하가 될 때)까지 계속하는 방식과 침하진행상황에 관계없이 각 하중단계 모두 일정시간만 하중을 유지하는 방식이 있다. 재하하중이 시험 최대하중에 도달하여 지지력의 판정에 필요한 변위량이 확인될 때 시험을 종료한다.

본 시험에서는 모래의 경우 재하하중을 0.2~1.2kN까지 0.2kN씩 6단계, 점토의 경우 0.04~0.32kN까지 0.04kN씩 8단계로 재하하중을 계획하였다. 재하 결과, 그림 14와 그림 15에서 나타난 것과 같이 재하하중 단계가 각각

1.2kN과 0.32kN일 때 침하량이 급격히 증가하여 시험을 종료하였다. 앞서 언급한 평판재하시험 시 하중 유지 시간 방법 중 하나인 1분간의 침하량이 각 하중강도에 의한 단계에서 침하량의 1%이하일 때, 그 단계에서의 하중 재하를 종료하고 다음단계의 하중을 재하하는 방법을 이용하였다.

5.2 결과 및 분석

5.2.1 하중-침하 관계

그림 16 및 17은 모래와 점토에 대해 스크류재하시험 장치의 변위 보정 전·후의 하중-변위 그래프를 나타내었다. 재하하중단계가 각각 1.2kN, 0.32kN일 때 침하가 상대적으로 크게 증가하여 시험을 종료하였으며 앞서 언급한 변위보정값을 적용하여 구한 침하량은 다이얼게이지를 통해 얻어진 실제 2차 실린더의 침하량과 거의 일치하였다. 이는 하중-변위 곡선의 신뢰성을 보여준다.

5.2.2 단위지지력 산정

재하 시험 데이터로부터 단위항복지지력 및 단위극

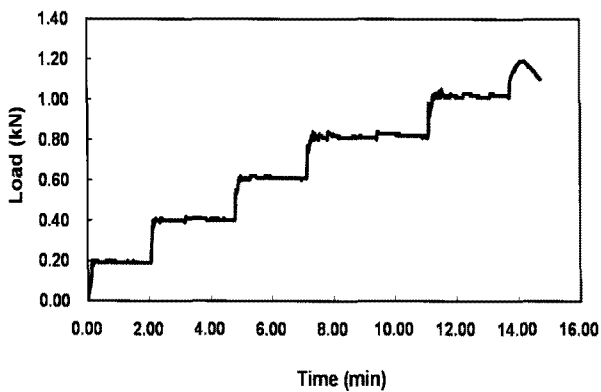


Fig. 14. Time-load curve (Joomunjin sand)

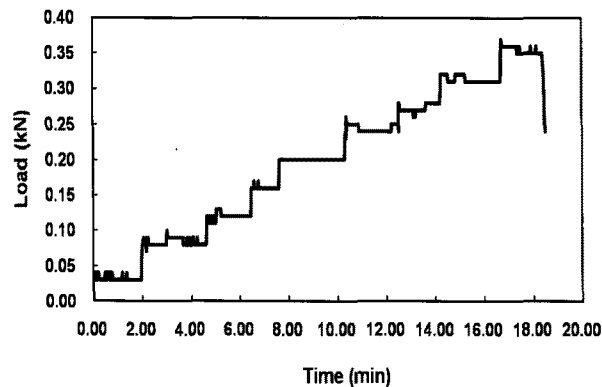


Fig. 15. Time-load curve (Busan newport clay)

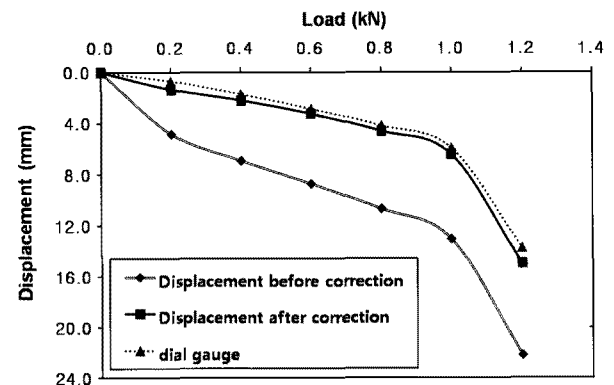


Fig. 16. Load-displacement curve (Joomunjin sand)

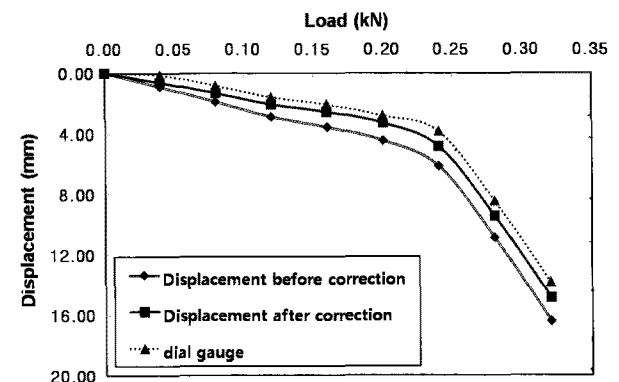


Fig. 17. Load-displacement curve (Busan newport clay)

한지지력을 산정하는 방법에는 p-S분석법(최대곡률법), logp-logS분석법, S-logt 분석법, 그리고 재하판 크기의 10% 침하량에 해당하는 하중을 극한하중으로 보는 방법 등 여러 가지 방법이 있지만(김도열, 2002), 이들 방법 중 가장 간편한 방법인 p-S분석법(최대곡률법)을 이용하여 지지력을 산정하였다. 이는 지지력-침하 관계에서 곡선이 가장 크게 변하는 하중을 단위항복하중으로 결정하며, 스크류재하판 폭의 약 2배 깊이까지의 토질이 균일한 경우에는 다음과 같은 표 3을 통해 단위극한지지력, 단위허용지지력을 산정할 수 있다.

그림 18 및 그림 19에는 모래와 점토에 대한 지지력-침하 관계를 나타내었다. 그림 18에서 보는 것과 같이 모래의 경우 단위항복지지력 p_{by} 는 228kPa로 산정되었고 단위허용지지력 p_{ba} 는 114kPa로 산정되었다. 같은 방법으로 점토(그림 19)의 지지력을 산정할 수 있었으며 단위항복지지력 p_{by} 는 53kPa, 단위허용지지력 p_{ba} 는 26.5 kPa으로 나타났다. 단위극한지지력 p_{bu} 는 일반적으로 단위항복지지력의 1.5배라고 가정하며, 모래의 경우 단위극한지지력 p_{bu} 는 342kPa, 점토의 경우 단위극한지지력 p_{bu} 는 79.5kPa로 산정되었다.

5.2.3 점착력 c 와 내부마찰각 ϕ 의 역산정

보통 흙의 물리적 특성을 이론식에 대입하여 단위극

Table 3. Estimation of unit bearing capacity

Description	Symbol	Equation
Unit yield bearing capacity	p_{by}	—
Unit allowable bearing capacity	p_{ba}	$0.5 \times p_{by}$
Unit ultimate bearing capacity	p_{bu}	$1.5 \times p_{by}$

Table 4. Parameters of the field specimen (Joomunjin sand)

Shape factor	circle	S_c	1.3
		S_q	0.6
		S_r	0.6
Depth factor	d_c	$1 + 0.2K_p^{1/2}(D_f/B)$	
	d_q	$1 + 0.1K_p^{1/2}(D_f/B) (\phi \geq 10^\circ)$	
	d_r		
$D_r = 85\%$, dry density (N/m^3)	$\gamma_{d85\%}$	15.406	
Ultimate bearing capacity (kPa)	p_{bu}	342	
Cohesion of sand (kPa)	c	0	
Depth (m)	D_f	0.1	

* $K_p = \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$

한지지력을 구하지만 역으로 스크류재하시험을 통해 구한 단위극한지지력을 이용하여 점착력 c 와 내부마찰각 ϕ 를 추정해 볼 수 있다. 일반적으로 평판재하시험과 같은 경우 재하판의 크기를 2종류 이상으로 하여 스크류재하시험에서 구한 단위극한지지력을 식 (2)에 대입, 연립 방정식을 풀어 c 와 ϕ 를 추정할 수 있지만 스크류재하판의 크기 조절이 불가능하므로 토질시험결과나 기존의 자료에서 적당한 c 와 ϕ 를 가정해야 한다. 보통 모래의 경우 $c=0$ 으로 가정해 ϕ 를 추정하며 점토의 경우 $\phi=0$ 으로 가정하고 c 를 추정한다. 식에 필요한 정수값

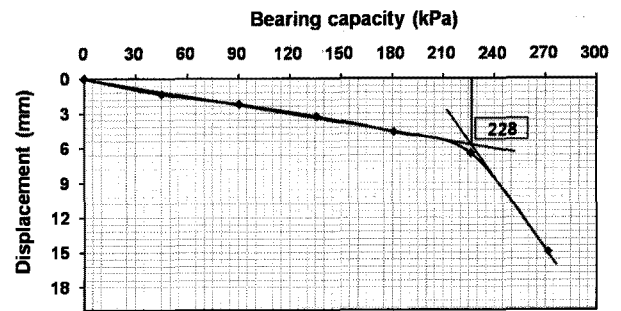


Fig. 18. Unit yield bearing capacity (Joomunjin sand)

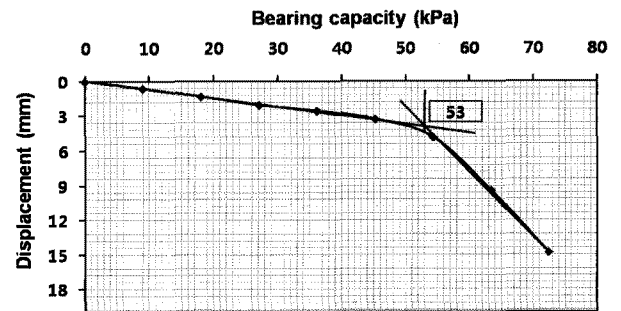


Fig. 19. Unit yield bearing capacity (Busan newport clay)

Table 5. Parameters of the field specimen (Busan newport clay)

Shape factor	circle	S_c	1.3
		S_q	0.6
		S_r	0.6
Depth factor	d_c	1.15	
	d_q	1.0	
	d_r	1.0	
Coefficient of bearing capacity	N_c	5.14	
	N_r	0	
	N_q	1.0	
Wet density (N/m ³)	γ_t	18.443	
Ultimate bearing capacity (kPa)	p_{bu}	79.5	
Angle of internal friction of clay (°)	ϕ	0	
Depth (m)	D_f	0.1	

은 표 4와 표 5에서 보여주고 있다.

$$p_{bu} = cN_c s_c d_c + \frac{1}{2} \gamma_1 B N_r s_r d_r + r_2 D_f N_q s_q d_q \quad (2)$$

여기서, p_{bu} = 단위극한지지력

B = 재하판의 폭

γ_1, γ_2 = 재하판 저부와 상부 흙의 단위중량

D_f = 기초의 근입깊이

N_c, N_r, N_q = 지지력 계수

$N_c = (N_q - 1) \cot \phi$

$N_r = (N_q - 1) \tan(1.4\phi)$

$N_q = e^{\pi \tan \phi} \cdot \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$

s_c, s_q, s_r = 형상계수

d_c, d_q, d_r = 깊이계수

표 4와 표 5에 나타난 정수값을 식 (2)에 대입하여 정리하면 모래와 점토의 경우 각각 다음과 같다.

1) 모래의 경우

$$342 = \frac{1}{2} \times 15.406 \times 0.075 \times [e^{\pi \tan \phi} \cdot \tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) - 1]$$

$$\begin{aligned} & \times \tan(1.4\phi) \times 0.6 \times \left[1 + 0.1 K_p^{\frac{1}{2}} \left(\frac{0.1}{0.075} \right) \right] + 15.406 \\ & \times 0.1 \times [e^{\pi \tan \phi} \cdot \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})] \\ & \times 0.6 \times \left[1 + 0.1 K_p^{\frac{1}{2}} \left(\frac{0.1}{0.075} \right) \right] \end{aligned}$$

2) 점토의 경우

$$79.5 = c \times 5.14 \times 1.3 \times 1.15 + 18.443 \times 0.1 \times 0.6$$

그 결과 모래의 내부마찰각 ϕ 는 43.87°, 점토의 점착력 c 는 10.20Pa으로 추정되었다.

5.2.4 점착력 c 와 내부마찰각 ϕ 비교

앞서 이론식에서 구한 점착력과 내부마찰각이 실제 토질시험을 통해 구한 결과 값과 어떠한 차이를 보이는지 알아보기 위해 동일한 조건의 시료에 대하여 모래의 경우 직접전단시험을 실시하였으며, 점토의 경우는 UU 삼축시험을 실시하였다.

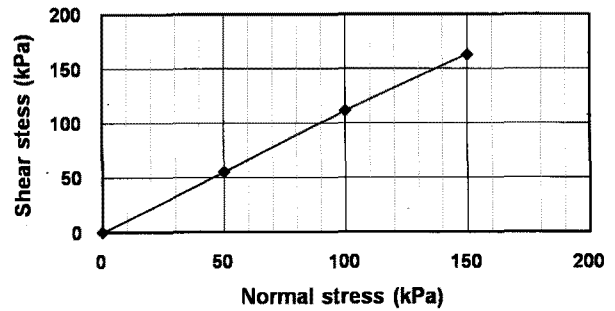


Fig. 20. Direct shear test of Joomunjin sand

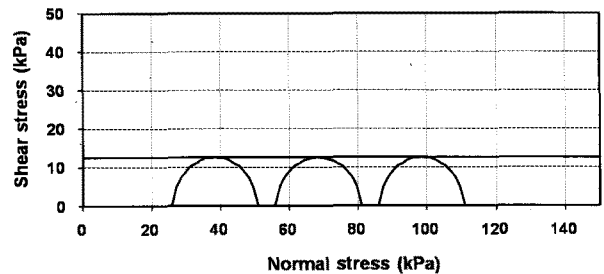


Fig. 21. UU Triaxial compression test of Busan newport clay

Table 6. Comparison of results about presumption and soil test

Symbol	Joomunjin sand		Busan newport clay	
	Presumption	Direct shear test	Presumption	UU-Triaxial compression test
c (kPa)	-	-	10.20	12.60
ϕ (°)	43.87	47.72	-	-

주문진표준사의 직접전단시험 결과와 부산신항점토의 UU삼축시험결과를 그림 20 및 그림 21을 통해 확인할 수 있다.

이론식으로 구한 값과 시험값을 표 6에 나타내었다. 토질시험을 통해 구한 극한지지력 p_{bu} 을 식 (2)에 대입하여 역으로 추정된 점착력 c 와 내부마찰각 ϕ 는 시험으로 구한 실제 점착력 c_t 와 내부마찰각 ϕ_t 보다 작음을 확인할 수 있다. 이 결과는 강소성 이론에 의한 전면 전단 파괴가 아닌 진행성 파괴가 발생하기 때문이라고 보여지며, 이를 다시 역으로 생각해보면 실제 토질시험에서 구한 단위극한지지력이 이론식에 의한 단위극한지지력보다 작게 평가됨을 알 수 있다.

5.2.5 지반반력계수(Modulus of subgrade reaction)

지반반력계수 K 는 p-S 곡선에서 보통 $\delta = 0.125cm$ 에 대한 q/δ 의 값으로 구하며, 지지력계수라고도 한다. 지반반력계수 K 는 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$K(N/cm^3) = \left[\frac{q(N/cm^2)}{\delta(cm)} \right]_{\delta=0.125cm} \quad (3)$$

본 시험에서는 그림 22에서 보는 것과 같이 모래의 경우 침하가 0.125cm일 때 지지력은 41.4kPa이었다. 따라서 식 (3)을 이용하면 모래의 지지력계수 K_s 의 값은 $33.12N/cm^3$ 으로 구할 수 있으며, 점토의 경우 그림 23에서 보는 것과 같이 침하가 0.125cm일 때 지지력은 18.5 kPa이므로 점토의 지지력계수 K_c 의 값은 $14.80N/cm^3$ 로 구할 수 있다. 이 결과는 일반적인 흙의 대한 지지력계수 표 7을 통해 그 신뢰성을 입증할 수 있다.

표 7은 일반적인 모래 및 점토에 관한 지반반력계수의 범위를 나타낸 것으로서, 모래의 경우는 조밀정도, 점토의 경우는 극한지지력 범위에 따라 지반반력계수

Table 7. Range of values of Modulus of subgrade reaction (Bowles, 1988)

Soil type		Modulus of subgrade reaction (K), N/cm^3
Loose sand		4.8-16
Medium sand		9.6-80
Dense sand		64-128
Clayey soil	$q_u < 200kPa$	12-24
	$200 < q_u < 400kPa$	24-48
	$q_u > 400kPa$	> 48

※ 여기서, q_u = 극한지지력

의 범위를 분류하였다. 따라서 시험을 통해 구한 지반반력계수와 일반적인 흙의 지반반력계수를 비교하기 위해서는 먼저 시험지반이 해당되는 지반유형을 산정하는 것이 중요하다. 본 시험은 상대밀도 85%의 주문진표준사 지반 및 50kPa로 압밀된 부산신항점토 지반에서 이루어졌으며, 그 결과 점토지반의 극한지지력은 q_u 는 79.5kPa(그림 19)로 나타났다. 따라서, 주문진표준사는 조밀한 모래지반, 부산신항점토는 $q_u < 200kPa$ 해당되는 점토지반임을 알 수 있다.

결과를 살펴보면, 먼저 부산신항점토의 지반반력계수 K_c 는 $14.80N/cm^3$ 로 표 7에 나타난 점토의 지반반력계수($K=12\sim24N/cm^3$)의 범위에 부합하여 시험결과의 신뢰성을 확인할 수 있다.

하지만 주문진표준사의 K_s 는 $33.12N/cm^3$ 로 조밀한 모래지반의 지반반력계수($K=64\sim128N/cm^3$)에 미치지 못하며 중간정도 조밀한 모래($K=9.6\sim80N/cm^3$)에 해당되는 지반반력계수를 갖는 것으로 나타났다. 이 결과는 주문진표준사가 일반모래에 비해 가는모래에 해당되고 이로 인해 상대적으로 작은 지반반력계수를 가지기 때문에 표 7에 비해 그 값이 다소 과소평가 되었다고 사료된다.

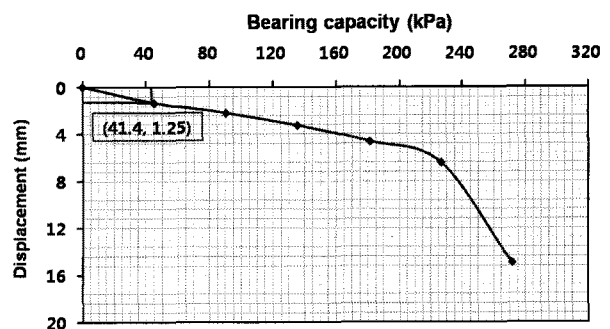


Fig. 22. Modulus of subgrade reaction (Joomunjin sand)

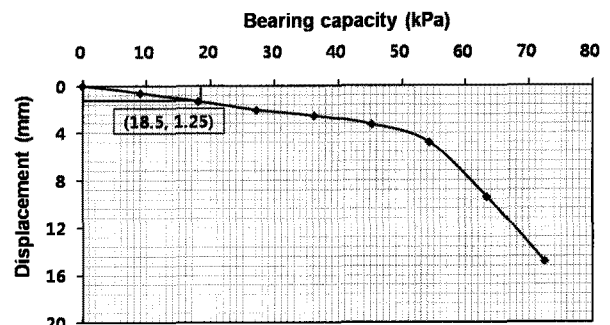


Fig. 23. Modulus of subgrade reaction (Busan newport clay)

6. 결 론

- (1) 기존의 연구를 검토한 결과 원위치시험 중 하나인 스크류재하시험은 현장에서 점성토와 비점성토의 지반공학적 특성 측정을 위하여 활용되어진 전통적인 평판재하시험의 개량된 장치로 시험 시 지반의 교란을 최소화한다.
- (2) 새롭게 개발한 스크류재하시험장치는 크게 스크류 판 및 재하축, 유압실린더장치, 하중재하장치, 하중 제어 및 측정장치로 이루어져 있고, 하중장치의 부피와 무게를 간소화 시켜 이동성이 뛰어나고 육상이나 해상 설치가 용이하여 광범위한 범위에서 연약지반 조사와 공사비 절감을 기대할 수 있다.
- (3) 새롭게 개발된 스크류재하시험장치를 검증하기 위해 주문진표준사와 부산신항점토를 이용하여 모형 지반에 실내시험을 실시하였고 그 결과 하중-침하, 지지력-침하 곡선을 유도하였다. 스크류재하판을 평판으로 간주, 평판재하시험 이론과 동일한 원리로 단위극한지지력 p_{bu} 및 지반반력계수 K 를 산정하였으며 그 값은 모래의 경우 342kPa, 33.12N/cm³, 점토의 경우 79.5kPa, 14.80N/cm³로 나타났다.
- (4) 스크류재하시험에서 구한 단위극한지지력을 이용, 이론식을 통하여 점착력과 내부마찰각을 추정하였다. 또한 실제 흙이 가지고 있는 강도정수의 비교를 통해 신뢰성을 확보하고자 같은 조건의 주문진표준사 및 부산신항점토에 대한 직접전단시험과 UU삼축압축시험을 실시하였다. 그 결과 주문진표준사의 경우 이론식과 직접전단시험으로 구한 내부마찰각 ϕ 는 각각 43.87°, 47.72°로 나타났으며 부산신항점토의 경우 이론식과 UU삼축압축시험으로 구한 점착력 c 는 각각 10.20kPa, 12.60kPa로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 지역기술혁신사업 차세대해안 공간확보기술(05 지역특성 B04)의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 김도열 (2002), *평판재하시험을 이용한 지지력 및 침하량 산정시 모래와 점토의 혼합비율에 따른 Scale Effect 연구*, 박사학위논문, 한양대학교, pp.62-65.
2. Bergado, D. T., and Huan, N. M. (1987), "Undrained Deformability and Strength Characteristics of Soft Bangkok Clay By the Screw Plate Test", *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.10, No.3, pp.113-122.
3. Bowels, J. E. (1988), *Foundation Analysis and Design*, Fourth Edition. New York: McGraw-Hill.
4. Dahlberg, R. (1975), "SETTLEMENT CHARACTERISTICS OF PRECONSOLIDATED NATURAL SANDS", *Natl Swed Build Res Doc*, Vol.D, pp.316.
5. Huan, N. M. (1986), *Undrained Deformability and Strength Characteristics of Soft Bangkok Clay by the Screw Plate Test*, M. Eng. Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
6. Gould, J. H. (1967), *The comparative study of screw plate and rigid plate bearing tests*, M.S. thesis, University of Florida, Gainesville, FL.
7. Janbu, N., and Senneset, K. (1973), "Field compressometer: principles and applications, Proceedings", *8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, Moscow, pp. 191-198.
8. Kummeneje, O., and Eide, O. (1961), "Investigation of loose sand deposits by blasting", *Proceedings 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.2, Paris, pp. 491-497.
9. Kay, N., and Avalue, D. L. (1982), "Application of screw plate to stiff clays", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.108, No.1, pp.145-154.
10. Schmertmann, J. H. (1970), "Static cone to compute static settlement over sand", *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(SM3), pp.1011-1043.
11. Selvadurai, A. P. S., Bauer, G. E., and Nicholas, T.J. (1980), "Screw plate testing of a soft clay", *Canadian Geotechnical Journal*, 17:465.

(접수일자 2009. 11. 27, 심사완료일 2011. 1. 6)