점토 표면의 현장 평가를 위한 장착형 계측장비 개발

Development of Wearable Device for Field Condition Evaluation of Clay Surface Layer

조소현* · 진다빈** · 강승민*** · 김현기****

Cho, So-Hyun*, Jin, Da-Bin**, Kang, Seung-Min***, and Kim, Hyun-Ki****

Abstract

The purpose of this study is to develop a wearable device that can help to evaluate the field conditions and determine the construction method before construction. It is essential for designers and engineers to understand the engineering characteristics of site soils through various field tests and laboratory tests. However, because of considerable time and cost taken by the conventional testing methods, it is evaluated and determined in many cases merely based on the field engineers' personal experiences or intuitions whether the ground conditions is satisfied or not. This study proposes a wearable soil strength measurement device to evaluate the state of the clay surface more efficiently.

Key words : Soft Ground, Shearing Strength, Portable Device

요 지

본 연구는 점토지반 표면의 현장상태를 빠르고 간편하게 평가할 수 있는 현장 시험 장비를 제안하였다. 연약지반에 대한 시공방법을 정하기 전에 현장의 함수비, 밀도, 전단강도 등 여러 자료가 필요하지만 일반적으로 쓰이는 현장 시험들은 많은 시간과 비용을 필요로 한다. 그럼에도 불구하고 많은 경우에 지반이 그 하중을 충분히 버틸 수 있는지에 대한 여부를 현장 시공자의 경험에 근거하여 판단한다. 그래서 본 연구는 시험자의 체중을 이용한 관입 깊이로 점토 지반 표면의 상태를 파악할 수 있는 장착형 계측 장비를 제안하였다.

핵심용어 : 연약지반, 전단강도, 휴대용 장비

1. 연구 배경 및 목적

지난 2015년 4월 16일, 경남 김해시의 한 아파트 신축공사 현장에서 콘크리트 펌프카 전도 사고가 발생했다(Fig. 1 참조). 3일 동안 내리 내린 비가 그친 후 해당 현장은 점토가 섞인 사질 지반이었는데 며칠 동안 내린 비로 인해 훨씬 더 연약해진 상태였다. 그럼에도 불구하고 공기를 맞추기

위해 강우 직후에 콘크리트 펌프카를 이용한 콘크리트 타설 작업을 진행하는 과정에서 아웃트리거 받침목이 주저앉으면서 장비가 전도하였고 장비 위에서 작업하던 건설 노동자가 추락하면서 장비에 부딪혀 사망하는 사고가 발생하였다.

Fig. 2는 2012년 8월 대구 도시철도 3호선 공사현장에서 발생한 사고 사진으로 연결 통로 공사를 위한 가시설을 설치하는 작업을 위해 천공기를 이동하는 과정에서 지표가

*정회원, 국민대학교 건설시스템공학부 연구조교(E-mail: chosh202@naver.com)

Member, Research Assistant, Department of Civil and Environmental Engineering

**정회원, 국민대학교 건설시스템공학부 연구조교

Member, Research Assistant, Department of Civil and Environmental Engineering

***정회원, 국민대학교 건설시스템공학부 연구조교

Member, Research Assistant, Department of Civil and Environmental Engineering

****교신저자, 정회원, 국민대학교 건설시스템공학부 부교수(Tel: +82-2-910-4692, Fax: +82-2-910-4939, E-mail: geotech@kookmin.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering

연약해진 지반에 놓인 천공기가 지나가는 차 위로 쓰러지면서 사망자가 발생한 사고이다. 연약한 지반에 큰 하중이 가해지면서 지반이 이완되어 침하가 발생하면서 장비가 전도된 것이다. 두 사례 모두 연약한 지반의 표면에 대한 적절한 판단이 부족한 상황에서 무리하게 공사를 진행하다가 인명사고까지 발생한 경우인데 이러한 사고를 미연에 방지하기 위해 적절한 기준을 통한 정량적인 판단을 하기 보다는 현장 책임자의 자의적인 판단에 의지하고 있다.

Fig. 1. Overturning of Concrete Pump Truck in Gimhae, Gyeongsangnam-do (Oh my News, 2015)

Fig. 2. Overturning of Piercer in Daegu, Gyeongsangbuk-do. (Yeongnam News, 2012)

국토교통부에서 운영하는 ‘건설안전정보시스템’에 따르면 지난 10년 동안 발생한 건설 현장 사고 가운데 건설장비의 전도로 인한 사고건수가 78건, 적당하지 않은 지반 및 지하상태로 인한 사고건수는 25건으로 나타났다. 앞서 소개된 사례와 같이 공사 과정이라 할지라도 적절한 지반조사를 하지 않게 되면 고하중의 장비가 집중하중 등으로 연약해진 지반에 진입하거나 작업을 수행 할 때 지반이 장비의 하중을 버티지 못해 장비가 전도되는 사고가 종종 발생하게 된다. 물론 충분한 비용과 시간을 들여 지반 상태를 지속적으로 조사한다면 이러한 사고를 최소화 할 수 있겠으나 현실적으

로 이러한 현장 지반 평가에 많은 노력을 기울이는 것에는 현실적인 한계가 있다.

연약지반의 대부분을 이루는 점토지반은 함수비가 증가함에 따라 전단강도가 급격하게 감소하게 되는데 액성한계 상태의 비배수전단강도는 10 kPa이하이고 소성한계 상태에서는 약 20~300 kPa 정도의 비배수 전단강도를 보이는 것으로 알려져 있다. Table 1은 각각의 장비가 진입하여 해당 작업을 수행하기 위해 최소한 요구되는 지반의 비배수 전단강도를 정리한 표이다. 아래의 표에서 보이는 것처럼 대부분의 장비가 진입시 필요한 지표면의 전단강도는 해당 지반의 함수비가 소성한계 이하로 반고체 상태여야 하는 것을 알 수 있다.

Table 1. Required Undrained Shear Strength for the Various Construction Equipments (Kim et al., 2000)

Equipment type	Su [kPa]
super-wet type bulldozer	>12
wet type bulldozer	>18
bulldozer (9~20 ton)	>30~42
bulldozer (20~32 ton)	>42~60
towed scraper	>42~60
motorized scraper	>60~78
dump truck	>90

현장에서 지반의 전단강도를 파악하는 것은 여러 가지 방법이 있으나 일반적으로 사용하는 평가 방법은 표준관입 시험이나 콘관입시험, 딜라토미터 시험 등과 같은 관입시험이라 할 수 있다. 그러나 이러한 현장시험을 진행하게 되면 장비 자체로도 크기가 상당히 크고 무게가 상당하며 시험을 실시하는 데도 상당한 비용과 시간이 필요하게 된다. 이에 본 연구에서는 앞에서 언급한 바와 같이 기존 시험 장비를 운용할 때 발생하는 경제적 시간적 부담을 고려하여 해당 지반의 지표면이 충분한 전단강도를 가지고 있음을 어느 정도 정량적으로 확인할 수 있는 휴대용 계측장비를 제안하고자 한다.

2. 점토 표면의 현장 평가를 위한 휴대용 계측 장비

본 연구에서는 원추 관입을 통해 점성토의 액성한계와 소성한계를 측정하는 Fall Cone 시험법이나 여러 콘 관입 시험에서와 마찬가지로 일정 크기의 원추가 일정 하중으로 점성토 지반에 관입하는 정도를 이용하여 해당 지반 표면의 전단강도 및 함수비 상태를 추정할 수 있는 계측 장비를 개발하고자 하였다.

원추형태의 콘을 점토지반에 관입시키게 되면 점토가

가진 전단강도에 따라 일정 하중에 의한 관입량 혹은 일정 관입량을 위한 필요 하중이 달라지게 된다. 점토지반의 전단 강도는 그의 함수비에 따라 달라지는데 함수비가 작을수록 점토지반의 전단강도가 증가하는 경향을 보이게 되고 이로 인해 일정 하중을 가한 원추의 관입량이 감소하게 된다 (Son and Lee, 2016; Kim et al., 2017).

본 연구에서 제안한 장비는 Fig. 3에서 보이는 것과 같이 각도 30도, 길이 5 cm의 원추 7개를 고무로 만든 발판 바닥에 달아 이를 신발에 장착하는 형태로 제작하였다. 이 때 원추를 Fall Cone 시험기나 다른 원추 관입 시험 장비와 마찬가지로 날카롭게 하면 시험자 및 시험장 주변 사람들의 부상 위험이 있고 단단한 지반에 사용하거나 장기간 여러번 사용할 경우 첨단부의 마모로 인해 시험결과와 편차가 발생할 수 있는 점을 고려하여 그림에서 보이는 것과 같이 원추의 첨단부를 부드럽게 설계하였다. 시험자는 이렇게 제작된 장비를 신발에 장착한 상태에서 시험대상인 연약지반의 표면에 체중을 이용하여 재하하고, 이때 원추의 관입깊이는 지반 표면의 함수비에 따른 전단강도에 의해 정해지게 된다.

(a) Schematic diagram of the proposed measurement device

(b) Photograph of the manufactured prototype device

Fig. 3. Schematic Diagram and Photograph of the Proposed Measurement Device

3. 장비의 적용성 검증을 위한 관입 시험

3.1 모형 점토 지반의 특성

본 연구에서는 대표적인 점토 광물 가운데 하나인 카올리나이트로 서로 다른 함수비 상태의 점토 시료를 성형하여 실험을 수행하였다(Fig. 4 참조). 시료의 함수비 상태를 소성 혹은 반고체 상태로 성형하기 위하여 다음 사진에서 보이는 것과 같이 시험에 사용된 카올리나이트의 액성한계와 소성한계를 KS와 BS에 규정된 시험을 수행하여 측정하

였다. 액성한계는 KS-F-2303에서 규정한 대로 Fig. 5에 제시된 장비의 황동접시 안쪽에 경사 60°, 높이 1 cm의 습윤된 점토로 인공사면을 형성시키고 시료의 정중앙을 분할한 뒤 1초에 2회의 속도로 낙하 시켰을 때 25회 가량에 해당되는 횟수에서 약 1.5 cm 정도의 길이로 양쪽의 점토시료가 서로 붙게 되는 상태에서의 시료함수비를 액성한계로 측정하였다. 그리고 소성한계는 KS-F-2304의 규정에 따라 유리판 위에서 습윤된 점토 시료를 가늘게 늘였을 때 부슬 부슬 끊어지는 상태가 되는 시료의 함수비를 소성한계로 측정하였다.

Fig. 4. Kaolinite

Fig. 5. Casagrande's Liquid Limit Measurement Device

BS에서 액성한계와 소성한계를 측정하는 방법 가운데 하나인 Fall Cone 시험은 Fig 6에 제시된 것과 같은 시험기를 사용하는데 구체적인 제원은 Table 2에서 보이는 것과 같이 국가별로 조금씩 다르다. 본 연구에서는 영국과 뉴질랜드의 규정에 따라 제작된 시험 장비를 이용하여 액성한계 시험과 소성한계 시험을 실시하였다. 본 연구에서 사용한 시험기의 원추는 각도가 30°, 중량이 80g이며, 원추의 자중만으로 5초 동안 시료에 관입시킬 때 관입량이 20 mm이면 그 시료의

함수비를 액성한계로 측정하였다. 그리고 액성한계 측정할 때와 같은 규격의 장비와 방법으로 실험하였을 때 관입량이 2.8 mm이면 그 시료의 함수비를 소성한계라고 한다. 시험결과, 해당 시료의 액성한계는 약 63%, 소성한계는 약 43%로 측정되었다.

Fig. 6. Fall Cone Test Device

Table 2. Various National Standards of Fall Cone Tests (Kwon, 2013)

	Cone		Penetration time [sec]	Penetration at LL [mm]
	Angle [°]	Weight [g]		
Sweden/Canada/Norway/Japan	60	60	5	10
UK/New Zealand	30	80	5	20
Russia	30	76	5	10
China	30	76	5	17
France	30	80	5	17
India	31	148	5	25.4

3.2 관입실험 결과 및 고찰

본 시험 장비의 사용성 검토를 위해 Fig. 7에서 보이는 것과 같이 하중재하 장치에 본 장비를 장착하여 하중에 따른 관입량을 측정하였다. 지반의 함수비에 따른 관입 저항의 차이를 알아보기 위하여 시험 지반의 함수비를 지반이 소성한계에 있는 구간을 중심으로 해서 해당 점토의 소성한계 43% 보다 함수비가 다소 낮은 36%부터 액성한계 63%보다 함수비가 다소 큰 65%까지 다양하게 하여 시험을 진행하였다. 시험에 적용된 지반의 함수비는 36%, 39%, 42%, 44%, 51%, 56%, 65%로 하였다.

Fig. 7. Penetration Test for the Prototype Device

Fig. 8은 앞서 설명한 것과 같이 다양한 함수비 상태에서 재하-관입 시험을 실시한 결과를 도시한 것이다. 그림에서 보이는 것과 같이 함수비가 커질수록 지반의 전단강도가 약해서 동일 하중 상태에서 장비의 관입량이 증가하는 것을 볼 수 있는데 점토의 함수비가 소성한계 이상이 되면서 급격하게 관입량이 증가하였다.

Fig. 8. Load vs. Penetration Curves of the Prototype Device for the Clay Specimens with Different Water Contents

Fig. 9는 앞의 관입시험 결과를 이용하여 체중이 50 kgf, 60 kgf, 70 kgf, 80 kgf인 시험자가 각각 본 시험장비를 착용하고 점토지반에 서 있는 경우 예상되는 관입량을 추정하여 도시한 그래프이다. 60 mm 이상의 관입량에 대한 자료는 앞서 실시한 시험 결과를 외삽하여 추정한 값을 이용하여 분석하였다. Fig. 9의 그래프에서 보이는 것과 같이 점토의 함수비가 소성한계 이하여서 반고체 상태일

때는 재하하중으로 작용하는 시험자의 체중에 따른 관입량의 차이가 크지 않고 80 kgf의 체중을 가진 시험자라 할지라도 50 mm 이내의 관입량을 나타내는데 반해 함수비가 소성한계 이상이 되어 점토가 소성상태가 되면 함수비의 증가에 따라 발생하는 점토지반의 전단강도 감소에 따라 급격하게 관입량이 증가하고 시험자의 체중에 따른 관입량의 차이도 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이를 통해 일반적인 체중을 가진 시험자가 본 장비를 착용하여 점토지반 표면에 서 있게 될 때 해당 점토지반의 함수비가 소성한계 이하로 반고체 상태이면 지반에 충분한 전단강도가 있어 장비에 부착된 50 mm 길이의 원추가 모두 관입되지 않으나, 소성한계 이상의 함수비로 점토지반이 소성상태이면 해당 원추가 모두 관입되는 것을 상정할 수 있으며 이러한 성질을 통해 본 장비를 이용하여 해당 지표면의 소성상태를 확인하는 것이 가능함을 알 수 있다.

Fig. 9. Clay Water Content vs. Penetration Curves for the Different Applied Loads

4. 결 론

본 연구에서는 연약한 점토지반 표면의 소성상태를 빠르게 파악할 수 있는 휴대용 계측 장비를 제안하였다. 이 장비는 점토의 전단강도나 연경도를 측정할 때 많이 이용하는 원추형 콘을 신발 표면에 다수 부착하고 시험자의 체중을 이용하여 지반에 관입하는 형태로 제안하였는데 개발된 장비의 사용성 및 적용성을 평가하기 위하여 실제 시제품 형태의 장비를 제작하여 관입 시험을 실시하였다.

관입 시험 결과 일반적인 체중을 가진 성인 시험자가 본 장비를 장착하고 소성한계 이하의 함수비를 가진 점토 지반에 서 있는 경우에 장치에 부착된 50 mm 길이의 원추가 모두 관입되지 않고 지반에 지지되는데 반해 소성한계 이상의 함수비를 가진 점토 지반에서는 충분한 전단강도가 확보되지 않아 체중을 이용한 하중 재하시 원추 모두가 관입됨을 알 수 있었다.

본 연구에서 개발한 장비가 기존의 관입 시험장비들과 비교할 때 정량적으로 보다 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있는 것은 아니나, 적은 비용을 들여 빠른 시간에 대략적인 지표면의 소성상태를 파악하는 데는 효과적으로 사용할 수 있을 것으로 기대한다. 또한 장비에 부착된 원추의 개수나 형태를 변형하게 되면 지반의 액성한계 상태를 평가하는 것도 가능할 것으로 예상한다. 단, 본 연구에서 적용된 카올리나이트 뿐 아니라 다른 점토에 대해서도 추가 연구를 실시하여 본 연구를 통해 개발된 장비의 현장적용성 검토를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구S04)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Campbell, D.A., and Blackford, J.W. (1984). *Fall cone method used to determine the liquid limit of soil*. US Bureau of Reclamation, Report No. GR-84-11, pp. 6-10.
- Kim, C.K., Yeo, J.S., Moon, Y.S., Park, H.Y., and Kim, T.H. (2017). Liquid and plastic limits of cohesive soil by static and dynamic test methods and testers. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 33, No. 3, pp. 5-15.
- Kim, G.S., Lim, H.D., Kim, D.K., and Lee, W.J. (2001). Characteristics of undrained shear strength of Yangsan clay. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 17, No. 4, pp. 259-267.
- Kim, G.S., Lim, H.D., and Lee, W.J. (2000). The effects of sample disturbance on undrained properties of Yangsan clay. *Proceedings of 2000 KGS Spring National Conference*, pp. 639-646.
- Kim, J.Y., Jang, E.R., Chung, C.K., and Jang, S.H. (2011). The optimum mixture condition for stabilization of Songdo silty clay. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 5, pp. 5-15.
- Kwon, H.S. (2013). A comparative study on liquid limit and plastic limit value of cohesive soil by dynamic and static test. Master's thesis, Daejin University, pp. 2-6.
- Oh my News. (2015). *Construction worker's death an accident* (April 16, 2015). Retrieved from http://www.ohmynews.com/NWS_Web/View/at_pg.aspx?CNTN_CD=A0002099988&CMPT_CD=SEARCH

Son, M.R., and Lee, J.Y. (2016). Study on the measurement of liquid limit using a penetration resistance of small cone in clay soil. *Journal of the Korea Geotechnical Society*, Vol. 32, No. 10, pp. 5-15.

Yeongnam news. (2012). *Boring machine overturing accident* (August 6, 2012). Retrieved from <http://www.yeongnam.com/mnews/newsview.do?mode=newsView&newskey=20120806.010060733190001>

wskey=20120806.010060733190001

Received	July 1, 2018
Revised	July 3, 2018
Accepted	July 30, 2018