

입자의 조건에 따른 정지토압계수 평가

Evaluation of at Rest Lateral Stress Coefficient Influenced by Particle Condition

이 정 훈¹ Lee, Jung-Hwoon이 동 열¹ Lee, Dong-Ryeol윤 태 섭² Yun, Tae-Sup이 준 환³ Lee, Jun-Hwan

Abstract

At-rest lateral stress coefficient that is used for the evaluation of geotechnical structures such as foundations and retaining walls plays a significant role in the analysis and design, as a state variable of in-situ stress condition. In the widely applied Jaky's Ko equation stress condition can be inferred from the internal friction angle obtainable from the laboratory experimentation whereas the equation makes it challenging to evaluate the influences and criteria of particle characteristics which is essential for the application of friction angles in practices. Thus, this study experimentally explored the behaviors of Ko depending on the relative density, particle shape, and surface roughness effect during a range of loading stages. The Ko values of Jumumjin sand, glass beads, and etched glass beads were measured using a customized Ko device housing strain gauges during loading-unloading-reloading steps, and the effect of dominant factors on Ko is analyzed. Results show that the high Ko prevails for both round and angular specimens with low relative density and the surface roughness has a nominal effect. The angular particles exhibit low Ko for specimens with similar relative density. The characteristics of relevance between Ko and friction angles with varying relative density are also investigated based on the experimental results using empirical correlations and previously reported values.

요 지

기초 구조물, 옹벽 등 지반 구조물의 거동 평가에 사용되는 정지토압계수는 현장 응력상태를 나타내는 상태변수로 해석과 설계에 매우 중요하다. 정규 압밀된 사질토에서 일반적으로 널리 쓰이는 Jaky의 Ko식은 실험에서 획득 가능한 마찰각으로부터 응력상태를 유추하지만, 실무에서 마찰각 적용시 필수적인 입자 조건에 따른 영향과 기준에 대한 평가가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 주요한 영향 인자로서 상대밀도, 원마도, 표면 거칠기에 따른 Ko값의 변화 양상을 다양한 하중 단계별로 실험에 고려하였다. 변형계를 사용한 Ko측정기를 제작하여 주문진 표준사, 글라스 비드, 에칭 글라스 비드에 대해 재하-제하-재재하의 단계별로 Ko를 측정하였고 영향 요인별 분석을 실시하였다. 실험 결과 원마도와 무관하게 작은 상대밀도의 시편이 높은 Ko를 보였으며 표면 거칠기는 Ko에 큰 영향이 없었다. 또한 동일한 상대밀도에서 입자가 모난 형상에 가까울수록 낮은 Ko를 보였다. 본 연구에서 획득한 실험 결과를 바탕으로 경험식과 문헌에서 보고된 데이터를 이용하여 상대밀도에 따른 Ko과 마찰각의 특성을 분석하였다.

Keywords : At rest lateral stress, Particle shape, Surface roughness, Jaky solution, Relative density

1 정희원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ.)

2 정희원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ.)

3 정희원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ., Tel: +82-2-3672-0542, Fax: +82-2-364-5300, junlee@yonsei.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

지반구조물의 해석과 설계, 기초지반의 거동분석에는 다양한 지반인자가 요구되며, 이 중 정지토압계수 K_0 은 주응력으로 주어지는 유효수평응력과 유효수직응력의 비를 나타내는 상태변수(state variable)이다. 정지토압계수는 1차원 압밀상태, 교란되지 않은 현장 응력 상태를 나타내는 가장 대표적인 상태변수이며, 지반공학 해석과 설계에 있어 핵심 거동요소인 압축성과 강도를 좌우하는 중요한 토질정수로 간주된다. 최근에는 실무적 차원에서도 소성상태를 고려한 정밀수치해석이 빈번이 이루어지고 있어, 초기응력상태를 정의하는 정지토압계수의 정확한 평가와 적용은 해석과 설계의 신뢰도 향상을 위해 매우 중요하다.

정지토압계수는 수직 및 수평토압의 직접적인 측정에 의해 얻어질 수 있으나, 실질적으로 지반공학분야에서는 내부마찰각과의 상관관계를 정의한 Jaky(1944)의 K_0 식이 가장 보편적인 방법으로 적용되고 있다. Michalowski(2005)는 이론적 접근을 통해 Jaky의 K_0 식을 재해석하였으며 샌드파일(sand pile)의 해석적 접근을 통해 Jaky의 K_0 식은 경험식이 아닌 이론식이며, 실제의 정지토압계수와 잘 부합함을 나타내었다. 그러나 유도과정에 포함된 임의적 가정사항과 현실성의 결여 등으로 인해 엄밀한 관점에서의 현상 설명에는 많은 불확실성이 아직 존재하는 것으로 확인되었다. 또한, 사질토의 경우 기존의 경험식과 비교하여 Jaky(1944)에 의한 K_0 은 상위한계(Upper bound)에 근접함이 발표된 바 있다(Mesri과 Vardhanabhuti, 2007).

정지토압계수 평가에 있어 가장 대표적 영향 인자는 마찰계수와 응력이력이다. 이러한 영향인자를 바탕으로 경험적으로 얻어진 다양한 관계식들이 제안되어 왔으며, 주로 선행압밀상태에 있어 수평토압의 증가를 나타내기 위한 OCR의 영향성을 정량적으로 표현하는데 초점이 맞추어져 왔다(Mayne과 Kulhawy, 1982). 최근에 이르러서는 고결된 지반요소의 정지토압계수에 관한 연구가 진행된 바 있으며, 고결된 경우의 정지토압계수는 Jaky의 식을 따르지 않는 비선형 거동을 보임이 확인되었다(Wang과 Leung, 2008; Yun과 Evans, 2011). 실제 실무 적용에 있어서는 마찰각의 적용과 관련하여 다양한 입자조건에 따른 영향과 이를 반영할 수 있는 기준자료가 중요하나 이에 대한 직접적 연구결과는 아직 미흡한 실정이다. 특히 다양한 입자조건에 의한 영향은 직접

적 평가가 어려우나, 체계적이며 구체적 분석결과는 정밀 지반해석을 위해 중요하다.

본 연구에서는 다양한 지반재료와 물성변화를 통해 지반요소의 정지토압계수에 대한 영향을 고찰하였다. 지반입자의 특성을 나타내는 요소 가운데 원마도와 거칠기 변화를 핵심인자로 선택하여 연구분석에 포함하였다. 이를 위해 일반 사질토와 글라스 비드(Glass bead)를 입자의 형상인자변화를 위해 사용하였으며 글라스 비드의 표면처리를 통해 거칠기 효과를 모사하였다. 실험을 위해 제작된 K_0 측정기가 사용되었으며 수평토압과 압축성, 응력이력의 변화 등이 실험에 고려되었다.

2. 정지토압계수의 평가

수직유효응력은 지하수위 및 흙의 깊이에 따라 산술적으로 평가되는 반면 수평유효응력은 직접적인 측정이 어렵다. 일반적으로 균질한 흙의 상태에서 정지토압계수는 수직유효응력과 수평유효응력의 비로 다음과 같이 표현된다.

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \quad (1)$$

정규압밀상태의 점성토와 사질토의 내부마찰각과 정지토압계수의 관계 가운데 가장 간단하며 널리 사용되는 식은 Jaky(1944)에 의해 제안된 식 (2)와 같다.

$$K_0 = 1 - \sin\phi' \quad (2)$$

정지토압계수와 내부마찰각의 응력 이력 범위가 상이함에도 불구하고 식 (2)는 정규압밀상태의 흙에 널리 적용되어 실내 실험을 통한 내부마찰각을 통해 실무에서의 K_0 을 산출하는데 쓰인다. 지반의 응력요소 중 수평토압은 하중의 이력상태에 크게 영향을 받게 되는 데, 이러한 응력을 반영하기 위하여, 재하단계에서의 K_0 은 OCR을 고려하여 식 (3)과 같이 제안되었다(Mesri과 Hayat, 1993).

$$K_0 = (1 - \sin\phi') OCR^{\sin\phi} \quad (3)$$

식 (3) 이외에 다양한 보정관계가 제안되어 왔으나, 재제하 단계까지 모든 응력상태 및 이력에 대한 관계는

Mayne과 Kulhawy(1982)에 의해, 약 170여 다른 종류의 점성토, 실트, 그리고 사질토의 하중 단계별 응력변화 자료에 기초하여 다음과 같은 식이 제안되었다.

$$K_0 = (1 - \sin \varphi') \left[\left(\frac{OCR}{OCA_{\max}^{(1 - \sin \varphi')}} \right) + \frac{3}{4} \left(1 - \frac{OCR}{OCR_{\max}} \right) \right] \quad (4)$$

여기서 OCR_{\max} 는 재료가 가진 최대 OCR 이다. OCR이 1인 정규압밀상태인 경우 식 (4)는 Jaky(1944)의 식과 같아진다.

3. 실험재료 및 정지토압계수 측정

3.1 재료 조성

입자조건의 영향을 분석하기 위해 본 연구에서 고려된 인자는 모남(angularity)의 변화로 대변되는 원마도와 마이크로 및 미시 스케일에서 나타나는 표면 거칠기를 핵심인자로 선택하였다. 동일한 하중 조건에 대한 원마도에 따른 효과를 평가하기 위해 일반 사질토로 구분되는 주문진 표준사와 구형 형상으로 구성된 글라스 비드(Glass bead)를 사용하였으며 동일한 형상과 하중조건 하에서의 표면 거칠기의 영향은 표면 처리된 글라스 비드를 사용하였다.

주문진 표준사에 대해 수행된 입도분포 분석결과는 Figure 1에 나타나 있다. Figure에서 보는 바와 같이 주문진 표준사의 평균입경은 $D_{50}=0.56\text{mm}$ 이며, 균질한 상태를 나타내고 있으나(균등계수 $C_u=1.46$) 일정양의 세립분과 조립분을 포함하고 있는 것으로 나타나고 있다. 본 연구에서는 20번 체를 통과하고 40번 체에 남은 시료만을 사용하였다. 이는 실험에 사용된 구형에 가까운

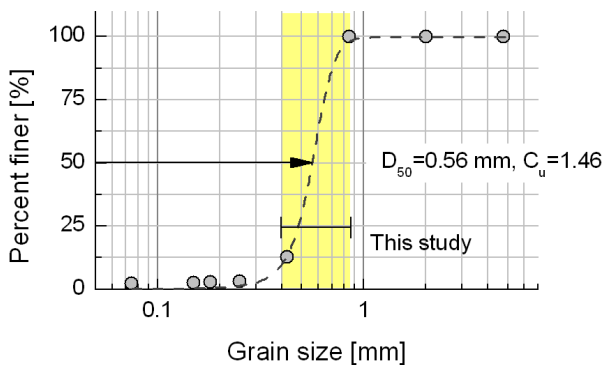
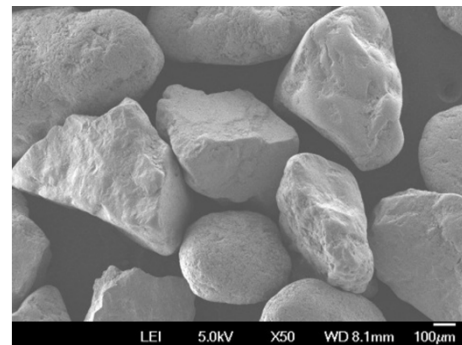


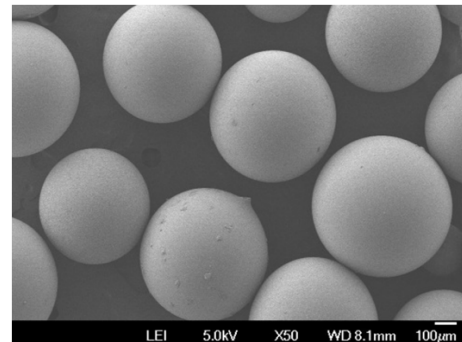
Fig. 1. GSD Curve of Jumunjin Sand

글라스 비드의 크기(직경0.4~0.6mm)와 유사한 균질한 모래 시료를 사용하여 입자 분포도 효과를 최소화하기 위함이다.

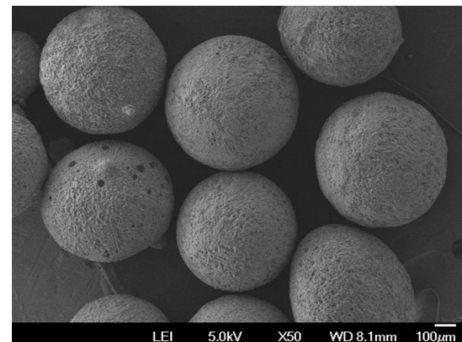
동일한 입자 형상에서 표면 거칠기의 효과를 측정하기 위해 본 연구에서는 글라스 비드의 표면에 화학적 에칭 기법을 적용하였다. 글라스 비드를 에칭 용액(염화수소 HCl, pH~1.0±0.5, (주진영)에 15초간 담가 표면 에칭 반응을 수행하고 탈이온수로 완전히 세정한 후 80도의 오븐에서 24시간동안 건조시켰다. Figure 2은 주사형 전자현미경(scanning electron microscope, JSM-6701F)으로 촬영한 주문진 표준사, 글라스 비드, 에칭된 글라스 비드 시편을 보여준다. 주문진 표준사는 불규칙하고 모난(angularity) 형태에 다소 거친 표면을 띠는 반면 글라스 비드는 매끈한 표면의 구형 입자를, 에칭된 글라스



(a) Jumunjin Sand



(b) Glass beads



(c) Etched Glass beads

Fig. 2. SEM images of Samples

비드는 표면이 수십 마이크로 미터 스케일에서 균질하게 삭각되어 표면에 전체 크기의 약 2-5% 정도로 높낮이가 있는 거친 상태를 보인다.

Table 1은 본 실험에 사용된 시편의 최소 및 최대 간극비이며 Table 2는 각 실험의 최초 간극비와 상대밀도이다. 입자 형상의 불규칙성으로 인해 주문진 표준사의 최소 및 최대 간극비 차이가 가장 크고 매끈한 표면의 구형 글라스 비드는 가장 작은 값을 보인다. 에칭에 의해 표면 거칠기가 발생하는 경우 최소 및 최대 간극비의 차이는 매끈한 글라스 비드의 경우보다 증가한다.

3.2 Ko 측정 장비

정지 토압 상태에서 흙에 가해지는 수평 하중을 측정하는 일반적인 방법은 삼축 압력 조건에서 수직 하중에 의해 발휘되는 수평 변위를 측정하여 이를 억제하기 위해 가해져야 하는 수평 압력을 통해 간접적으로 산출한다(Lohnes, 1993; Okochi과 Tatsuoka, 1984; Ting 등, 1994). 이 방법은 하중 단계별로 수평 변위를 정밀히 측정하고

이를 보상하기 위한 수평 압력을 지속적으로 계산하고 유지시켜야 하므로 응력경로가 일정하게 유지되지 않으며 다소 복잡한 실험 장비를 필요로 한다. 얇은 탄성 실린더에 변형률계를 부착하고 하중에 따른 수평 변위를 직접 측정하여 정지토압계수를 산출하는 기법도 다양한 조건하에서의 응력 상태를 평가하기 위해 사용되나 일반적으로 낮은 수직응력하에서 사용된다(Kolymbas과 Bauer, 1993; Mesri과 Vardhanabhuti, 2007; Shin과 Santamarina, 2009; Zhu 등, 1995). 얇은 평면 응력계를 일반적인 압밀 셀에 부착하여 수평 하중을 직접 측정하는 방법도 제안되고 있으나 응력계의 정밀도와 반복성은 변형률계 방법에 비해 다소 떨어진다(Yun과 Evans, 2011).

본 연구에서는 변형률계에 의한 수평 응력을 측정하고자 두께 0.13mm, 직경 66mm의 알루미늄 실린더를 이용하였다. 시료의 높이는 약 40mm로 높이와 직경의 비는 약 0.6이다. 한 쌍의 변형률계를(120ohm, CEA-13-240UZ-120, Vishay사) 실린더의 옆면에 부착시키고 다른 한 쌍과 각각 직렬로 연결하였다. 이는 휘트스톤 브리지(Wheatston Bridge) 형태로 온도에 따른 변위 발생

Table 1. Minimum and maximum void ratio

Void ratio	Jumunjin Sand	Glass beads	Etched Glass beads
e_{min}	0.624	0.6	0.65
e_{max}	0.969	0.735	0.890

Table 2. Initial void ratio and relative density of Sample

	Initial Void ratio	Relative Density (%)
Dense sand	0.658	88.9
Medium sand	0.728	68.6
Loose sand	0.789	50.6
Glass bead	0.657	56.5
Etch Glass bead 1	0.746	55.5
Etch Glass bead 2	0.690	81.3

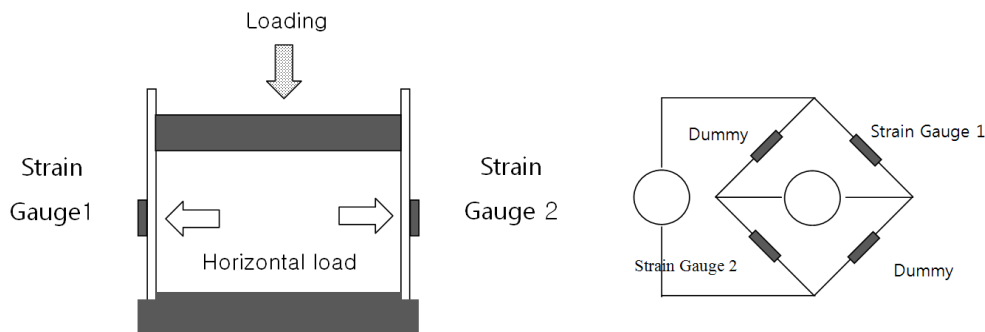


Fig. 3. K_0 measurements by using strain gauge

효과를 최소화시킬 수 있으며 전압차 측정을 통해 변위 발생을 측정할 수 있다. Figure 3은 본 연구에서 수평 응력 측정을 위해 사용한 실린더 및 계측기를 나타낸다. 제작된 Ko-측정기를 검증하기 위해 물을 채워 측정된 수압을 이용하였다. 물은 등방유체의 성질을 나타내므로 수직과 수평방향의 정수압 비가 항상 1이며 제작된 측정기에서의 응력값 또한 수압비 1에 상응하는 값을 나타내어야 한다. 계측센서의 보정을 위해 물이 채워진 얇은 멤브레인을 실린더에 넣고 수직하중에 따라 변하는 변형률계로부터 전압차를 단계별로 측정하여 식 5와 같은 관계식을 산출하였다.

$$V[mV] = 21 \cdot \sigma[kPa] + 101.51, R^2 = 0.9999 \quad (5)$$

여기서 σ 는 수직응력을, V는 계측기에서 측정한 전압차를 나타낸다. 앞서 기술한 바와 같이 비압축성 유체로 보정을 할 경우 수직응력과 수평응력의 비가 1이므로 하중단계에 따라 측정된 전압차를 통해 수평응력의 산출이 가능하다.

3.3 시험순서

각 시편은 실린더에 목표한 상대 밀도를 갖도록 tapping과 tamping을 이용하여 조성되었고 재하-제하-재재하 과정간 총 3단계의 하중 단계별 수평응력 및 수직변위를 측정하였다. 최초 하중 16kPa를 시작으로 32, 48, 80, 111kPa까지 5단계에 걸쳐 재하를 하였고 최초 하중까지 다시 5단계에 걸쳐 제하를 하였다. 이후 재하단계와 동일한 하중단계를 거쳐 143kPa까지 총 6단계의 재재하 과정을 시편마다 적용하였다. 변형률계는 데이터로거를

통해 매 1초마다 전압의 변화를 지속적으로 기록하였고 각 하중 단계는 10분간 지속되었다. 하중 단계별 전압값은 평균값을 이용하여 식 (5)의 보정계수를 통해 수평응력으로 환산하고 정지토압계수를 산출하였다. 정지토압 상태의 수평변위 한계(5×10^{-5})를 만족시키기 위해 최대 수직하중을 150kPa미만으로 제한하였다(Okochi과 Tatsuoka, 1984; Shin과 Santamarina, 2009).

4. 실험 결과

Table 1에서 보는 바와 같이 매끈한 표면을 갖는 구형의 글라스 비드는 최소 및 최대 간극비의 차이가 크지 않으며 에칭에 의한 표면 거칠기가 발생할 경우 그 차이는 다소 커진다. 모래의 경우 가장 큰 간극비 차이를 보인다. Figure 4는 각 시편별 최초 상대 밀도 및 그에 따른 재하-제하-재재하 단계별 간극비의 변화를 보여준다. 정지토압계수에 영향을 미치는 인자 분석은 1) 상대밀도, 2) 입자 표면거칠기, 3) 원마도로 나누었으며 각 영향 인자별 실험 결과는 다음과 같다.

4.1. 상대밀도 효과

Figure 5a는 느슨한 모래와 조밀한 모래, 그리고 그 중간 정도의 상대 밀도를 갖는 모래의 하중 증가에 따른 수평 응력을 나타낸다. 초기 상대밀도는 Table 2에 나타나 있듯이 큰 차이를 보이고 그에 따른 최초 간극비의 차이도 크다. 수직 응력이 증가함에 따라 수평 응력이 선형으로 증가하며 선형암밀하중 이하로 제하 동안 수평 응력의 감소폭은 재하보다 적다. 따라서 과압밀 상태에서의 Ko값은 항상 정규압밀상태보다 큰 값을 보이며

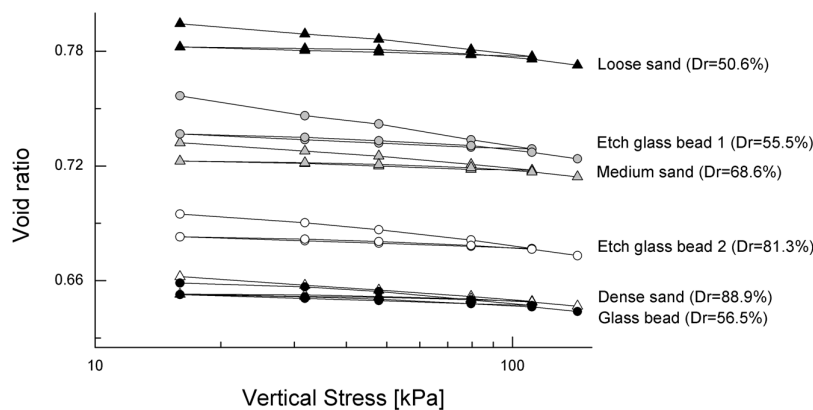


Fig. 4. Void ratio versus vertical stress

OCR이 증가함에 따라 커진다(Zhu과 Clark, 1994). 재하간 수평 응력은 재하와 재하시의 수평 응력의 중간값을 보이며 선행압밀하중 이후에는 정규압밀상태로 최초의 재하 단계에서 보인 증가 양상을 따른다. 이를 정지토압계수로 환산하면 Figure 5b에 도시한 바와 같다. 재하간 일정한 정지토압계수를 유지하며 재하시 비선형으로 값이 크게 증가한다. 재재하간 K_0 값은 재하간의 값으로 회복되며 선행압밀하중 단계 이후 일정한 값을 보인다. 본 실험에서 역시 정지토압계수는 모래의 상태가 조밀할 수록 작게 산출되었으며 상대밀도가 입자간 하중 전이 양상 및 그에 따른 정지토압계수에 큰 영향을 끼침을 알 수 있다.

두 가지 서로 다른 상대밀도로 조성된 에칭 글라스 비드의 경우 상대밀도가 55.5%와 81.3%로 차이를 보이며 수평 응력 및 그에 따른 정지토압계수는 Figure 6과 같다. 상대적으로 낮은 상대밀도 값을 갖는 에칭 글라스 비드 1의 K_0 이 에칭 글라스 비드 2보다 다소 크게 측정되었으며 이는 사질토의 실험 결과와 그 경향이 일치한다.

조밀한 시료의 경우 수직 방향으로 force chain이 잘 발달하여 수평 방향으로의 힘 전이가 느슨한 입자 시료보다 덜 발생하는 것으로 가정할 수 있다. 또한 느슨한 시료의 경우 입자들의 미끄러짐에 의해 시료의 직경이 커지려는 경향이[JL1] 탄성변형에 의해 줄어드려는 크기보다 크기 때문에 초기 간극비가 증가함에 따라 정지토압계수가 증가함이 실험적으로 증명된 바 있다 (Andrawes과 El-Sohby, 1973; Edil과 Dhowian, 1981).

4.2. 표면 거칠기 효과

매끈한 표면을 갖는 글라스 비드와 에칭 글라스 비드 1은 상대밀도가 약 56%로 비슷한 값을 갖는다. 수직 응력 증가에 따른 수평 응력증가 양상은 두 개의 시료 모두 비슷한 값을 보여 산출된 정지토압계수는 약 0.51의 값을 갖는다(Figure 7). 상대 밀도가 유사한 입자상 지반 재료의 경우 표면 거칠기와 무관하게 하중이 전이됨을 알 수 있다. 단, 제하간 글라스 비드의 K_0 이 모래 시료

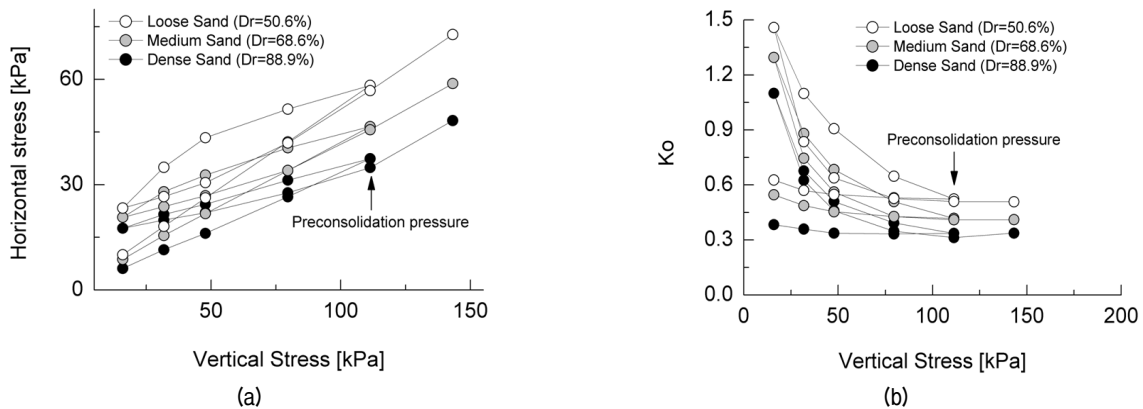


Fig. 5. Relative density effect of Horizontal stress and K_0 (Jumunjin sand)

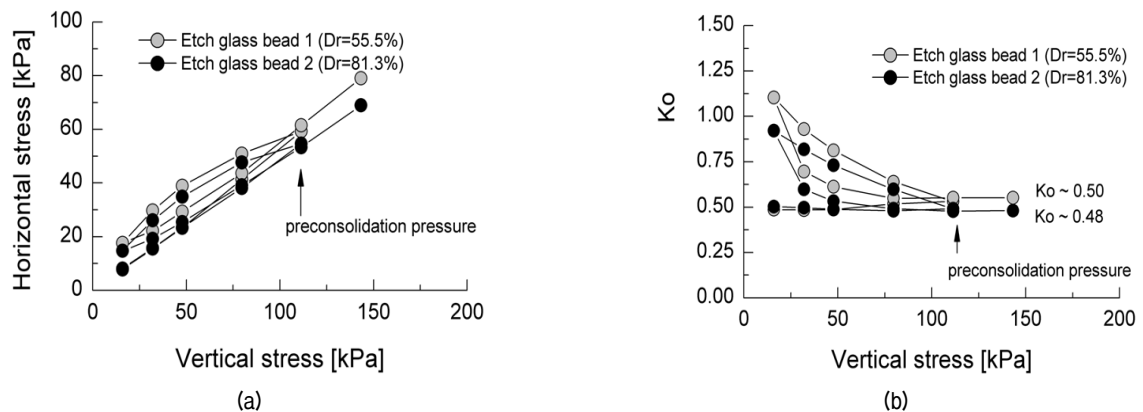


Fig. 6. Relative density effect of Horizontal stress and K_0 (Etched Glass beads)

들과 에칭 글라스 비드와는 다소 다르게 선형에 가깝게 증가한다. 이는 입자 표면이 매끄러워 마찰이 적으므로 하중에 의해 주변 입자들 사이의 간극에 조밀하게 위치했던 입자가 제하간 다소 쉽게 원 위치로 돌아가려 함에 기인한다. 본 실험에서 적용한 에칭 기법의 경우 표면 삭각 간격이 입자 크기의 약 2~5%로 표면 거칠기에 의한 입자간 역물림(interlocking) 효과는 정지토압계수에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

4.3. 원마도 효과

조밀한 모래와 비슷한 약 81%의 상대밀도를 갖는 에칭 글라스 비드 2의 수평 응력 및 정지토압계수 측정 결과는 Figure 8과 같다. 입자의 표면 거칠기가 유사하다고 가정할 때 입자가 구형에 가까울수록 정지토압계수가 크게 발휘되어 에칭 글라스 비드 2의 경우 0.48의 값을 갖는다. 이는 구형의 입자 경우 입자간 하중이 균질하게 주변 입자로 전이되는 반면 모난 입자의 경우

불균질하게 배열된 입자 접촉점을 따라 집중적인 force chain이 재하 방향으로 잘 발달되어 수평응력으로의 하중 전이가 등근 입자에 비해 작음에 기인한다. 또한 제하간 에칭 글라스 비드의 정지토압계수 변화는 모래보다 선형에 가까우며 이는 앞서 기술한 바와 같이 입자 사이 간극에 위치한 입자의 이탈이 수월하기 때문이다.

5. 토 의

정지토압계수 실험간 측정된 OCR과 하중단계별 OCR_{max}를 식 (4)에 이용하여 느슨한 모래와 글라스 비드의 실험 결과와 비교하면 Figure 9과 같다. 재하 단계의 Ko를 맞추기 위해 사용된 마찰각은 각각 30도와 27도이며 산출된 결과는 회색 실선으로 표현되었다. 느슨한 모래의 경우 식 (4)가 점성토를 포함한 다양한 지반 재료를 통해 계산된 식임에도 불구하고 재하-제하-재재하 단계간 실험에서 획득된 Ko과 평가된 값이 유사하며 OCR이 가장 큰 제하의 마지막 단계값 역시 일치한다.

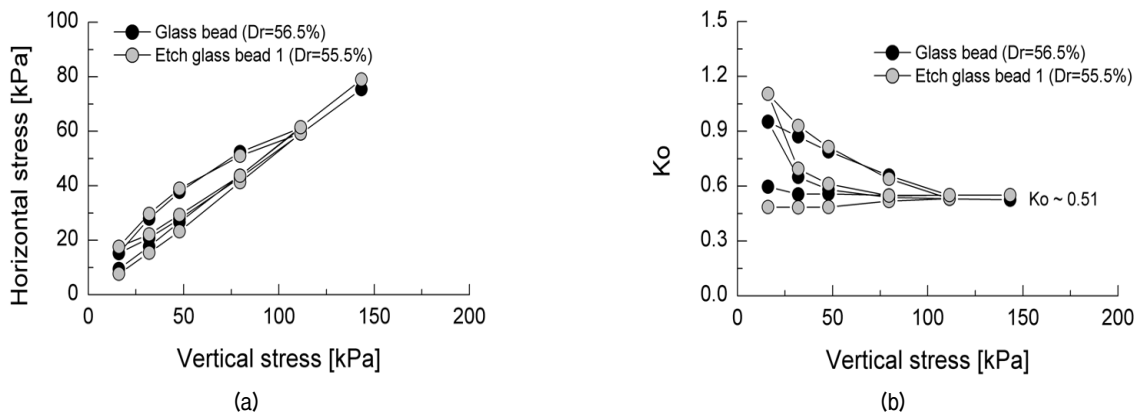


Fig. 7. Surface Roughness effect of Horizontal stress and K_0

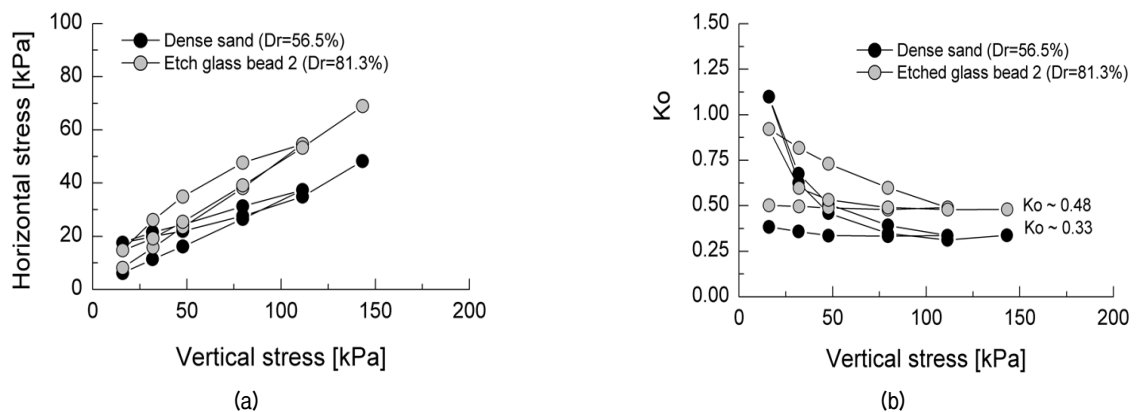


Fig. 8. Angularity effect of Horizontal stress and K_0 (Jumunjin sand)

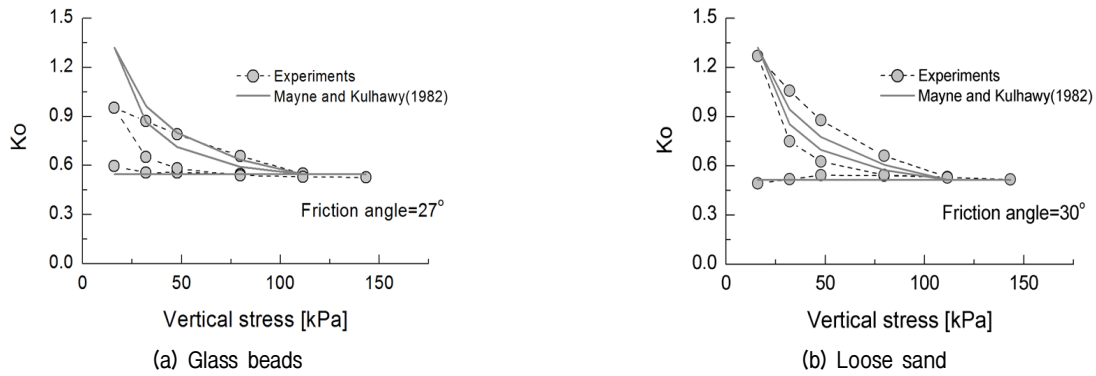


Fig. 9. 마찰각 평가 및 K_0 비교 (Jumunjin sand)

Table 3. Relative density and friction angle of Jumunjin Sand

Dr (%)	ϕ (degree)	e_{min}	e_{max}	experiments	Reference
72.8	40.2	0.606	0.835	Triaxial	Hong et al, 2010
89.2	47.1	0.617	0.846	Direct Shear	Im et al, 2000
96	51.7			Plain strain	
76.9	38.1	0.571	0.963	Direct Shear	Choi and Ko, 2011
74	47.6	0.596	0.992	Plain strain	Jang et al, 2008
55	35	0.6	0.95	Triaxial	Paik and Lee, 2008
86	37.5				
88.9	41.6	0.624	0.969	Ko measurement and eq.(2)	This study
68.6	35.6				
50.6	28.5				

반면 글라스 비드의 경우 실험에 의한 K_0 이 제하 및 재재하간 낮은 경향을 띠는데 이는 자연 지반 재료와 달리 표면 마찰력이 거의 없는 경우 제하간 수평 하중의 회복이 빨라 낮은 K_0 을 가짐에 기인한다.

본 연구에서 획득한 K_0 과 상대밀도는 Figure 10과 같이 반비례에 가까운 결과를 보인다. 입자의 원마도와 표면 거칠기가 다르다 하더라도 상대 밀도에 의해 K_0 이 좌우되어 정규압밀상태의 지반재료의 응력상태를 평가하는데 있어 상대 밀도의 효과가 가장 큼을 알 수 있다.

문헌에서 보고되고 있는 주문진 표준사의 상대밀도 및 다양한 실내실험 기법을 이용해 측정된 마찰각은 Table 3과 같으며 상대밀도에 따른 마찰각 변화는 Figure 11에 나타난다. 본 연구에서의 값은 K_0 으로부터 식 (2)를 이용하여 마찰각을 산출한 것으로 검은색 기호로, Table 3에 정리된 값들은 회색 기호로 표시되었다. 상대 밀도가 증가함에 따라 마찰각은 선형에 가까운 증가 양상을 보이며 회귀 분석결과 R^2 는 0.58이다. 실험법 및 조건이 상이함을 고려할 때 이 두 계수간의 관계는 잘 성립되나 Figure 11에서 제시한 관계식은 주문진 표준사에 국한되어 경험적으로 유효하다.

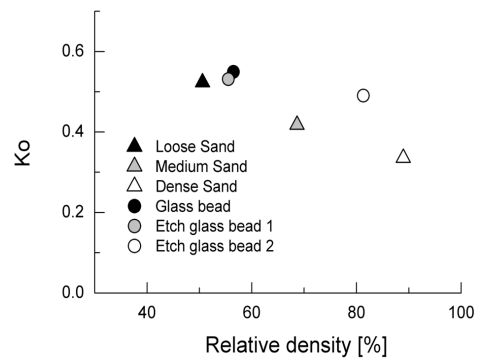


Fig. 10. K_0 changes according to relative density

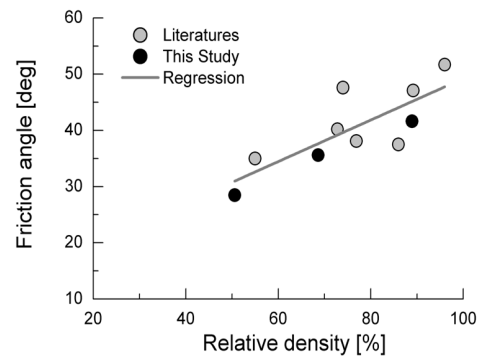


Fig. 11. Friction angle - Relative density plot of various experiments

6. 결론

본 연구에서는 정지토압계수에 영향을 주는 인자를 파악하기 위하여 다양한 시료에 대하여 하중 단계별로 정지토압계수를 측정하였다. 주문진 표준사, 글라스 비드, 에칭 글라스 비드를 활용하여 상대밀도, 원마도, 표면 거칠기를 달리한 시료를 얇은 탄성 실린더에 변형률계를 부착하여 재하-제하-재재하의 단계별로 수평응력을 측정하였다.

다양한 입자 조건이 정지토압계수에 영향을 끼치지만 특히 상대밀도가 정지토압계수를 결정하는 데 가장 지배적인 역할을 하고 있음을 실험 결과 확인하였다. 반면 표면 거칠기에 의한 정지토압계수의 변화는 없었으나, 제하시 정지토압계수 증가 양상은 매끈한 시료의 경우 그렇지 않은 시료에 비해 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 또 한 원마도에 따라서 상이한 force chain을 형성하게 되고 이로 인해 수직응력에 따른 지반재료의 거동이 달라질 수 있음을 유추할 수 있다.

Mayne과 Kulhawy(1982)가 제안한 식과 실험 결과를 비교를 통해 느슨한 모래의 경우 기존의 식과 유사함을 확인하였고, 글라스 비드의 경우 매끈한 표면에 의한 억물림(interlocking) 효과가 상대적으로 적게 나타나는 것을 보였다. 마지막으로 본 연구와, 기존에 수행된 주문진 표준사의 연구를 통해 알려진 상대밀도와 마찰각의 관계가 대략적으로 선형을 갖게 됨을 규명하였다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업으로 (No. 2011-0030845, 2011-0005593) 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Andrawes, K. Z. and El-Sohby, M. A. (1973), "Factors affecting coefficient of earth pressure K_0 ", *American Society of Civil Engineers, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99(SM7), pp.527-539.
2. Choi, C. H. and Ko, S. G. (2011), "A Study for predicting adfreeze bond strength from shear stress of frozen soil", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.10, pp.13-23.
3. Edil, T. B. and Dhowian, A. W. (1981), "At-rest lateral pressure of peat soils", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.107, No.2, pp.201-217.
4. Hong, W. P., Song, J. S. and Hong, S. (2010), "Punching shear failure in pile-supported embankments", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.26, No.3, pp.35-45.
5. Im, J. C., Lee, T. H. and An, M. H. (2000), "A study on the estimation of internal friction angle of sand ground through the bearing capacity experiments", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.20, No.11, pp.495-506.
6. Jang, E. R., Choo, Y. S., Lee, W. T. and Chung, C. K. (2008), "Restrained effect of end plate on plane strain test evaluated by digital image correlation method", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.7, pp.25-36.
7. Kolymbas, D. and Bauer, E. (1993), "Soft oedometer. A new testing device and its application for the calibration of hypoplastic constitutive laws", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.16, No.2, pp.263-270.
8. Lohnes, R. A. (1993), "Lateral stress ratios for particulate materials", *Powder Handling & Processing*, Vol.5, No.4, pp.331-336.
9. Mayne, P. W. and Kulhawy, F. H. (1982), "Ko-OCR relationship in soil", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 108 (GT6), pp.851-872.
10. Mesri, G. and Hayat, T. M. (1993), "Coefficient of earth pressure at rest", *Canadian geotechnical journal*, Vol.30, No.4, pp.647-666.
11. Mesri, G. and Vardhanabhuti, B. (2007), "Coefficient of earth pressure at rest for sands subjected to vibration", *Canadian geotechnical journal*, Vol.44, No.10, pp.1242-1263.
12. Michalowski, R. L. (2005), "Coefficient of earth pressure at rest", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering-ASCE*, Vol.131, No.11, pp.1429-1433.
13. Okochi, Y. and Tatsuoka, F. (1984), "Some factors affecting K_0 -values of sand measured in triaxial cell", *Soils and Foundations*, Vol.24, No.3, pp.52-68.
14. Paik, K. H. and Lee, J. H. (2008), "Calculation of bearing capacity of tapered drilled shafts in cohesionless soils using shape factor", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.12, pp.13-22.
15. Shin, H. and Santamarina, J. C. (2009), "Mineral dissolution and the evolution of K_0 ", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.135, No.8, pp.1141-1147.
16. Ting, C. M. R., Sills, G. C. and Wijeyesekera, D. C. (1994), "Development of K_0 in soft soils", *Geotechnique*, Vol.44, No.1, pp.101-109.
17. Wang, Y. H. and Leung, S. C. (2008), "Characterization of cemented sand by experimental and numerical investigations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.134, No.7, pp.992-1004.
18. Yun, T. S. and Evans, T. M. (2011), "Evolution of at-rest lateral stress for cemented sands: experimental and numerical investigation", *Granular Matter*, Vol.13, pp.671-683.
19. Zhu, F. and Clark, J. I. (1994), "Effect of dynamic loading on lateral stress in sand", *Canadian geotechnical journal*, Vol.31, No.2, pp.308-311.
20. Zhu, F., Clark, J. I. and Paulin, M. J. (1995), "Factors affecting at-rest lateral stress in artificially cemented sands", *Canadian geotechnical journal*, Vol.32, No.2, pp.195-203.

(접수일자 2012. 1. 18, 심사완료일 2012. 8. 3)