

낙동강 하상 모래와 점토의 불포화 전단강도 특성 평가

Unsaturated Shear Strength Characteristics of Nakdong River Sand and Clay

이대영^{1*}

Dae-Young Lee^{1*}

¹Member, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology., 283, Goyangdae-Ro, Ilsansseo-gu, Goyang, 411-712, Republic of Korea

ABSTRACT

The shear strength characteristics of an unsaturated earth material are highly important not only for evaluating the seepage characteristics but also the stability of levee for a lifelong. In this study, unsaturated strength characteristics of Nak-dong river sand and clay that frequently used for the levee construction in southern province of Korea were analyzed using unsaturated triaxial compressive test. The strength characteristics due to the variation of matric suction were analyzed using multi-stage compression technique and the results were directly compared with the non-linear formulation for the apparent cohesion (C_{max}), and the friction component ϕ^b were determined and evaluated from the test for the application of linear Mohr-Coulomb failure criteria. Cohesion and friction characteristics of the unsaturated levee material under various suction phases were also explored during this study.

요 지

가 , 가 , 가 .
(C_{max}) ϕ^b Mohr-Columb

Keywords : Levee material, Unsaturated triaxial compression test, Shear strength characteristic, Matric suction

1. 서 론

기후변화로 인해 전세계적으로 잦은 호우와 대규모 홍수 발생 증가로 제방 붕괴에 따른 위험은 훨씬 더 증가하게 되었다. 2002년 태풍 루사 및 2003년 태풍 매미에 의한 홍수피해의 예에서 볼 수 있듯이 하천 제방의 붕괴는 막대한 인명피해와 재산손실로 이어지기 때문에 대형 제방의 안정적인 유지관리 및 지속적인 안정성 검토가 매우 절실

하다고 할 수 있다.

일반적으로 제방 및 필댐의 내부는 투수성이 매우 낮은 재료가 사용되기 때문에 대부분 불포화 상태에 놓이게 된다. 제방 및 필댐의 바깥쪽 부분에는 비교적 투수성이 큰 재료로 이루어진 투수존이 존재하기 때문에 필댐의 상부 측에서는 저수위와 동일한 수위가 나타나지만, 차수존인 심벽을 통과하면서 투수성은 급격히 감소하기 때문에 필댐 하류에 있는 영역에서는 불포화 상태로 남게 된다. 저수위는 강우나 홍수 등 자연적인 변화와 홍수조절, 발전 등 인위적인 목적에 의하여 변하게 된다. 이러한 저수위의 변화로 인하여 필댐 심벽 내부의 간극수압도 변하게 된다. 특히 저수위 상승으로 인하여 심벽 내부에서 나타난 음의

Received 3 Sep. 2014, Revised 9 Nov. 2014, Accepted 11 Nov. 2014

*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0528; Fax: +82-31-910-0211

E-mail address: dylee@kict.re.kr (D. Lee)

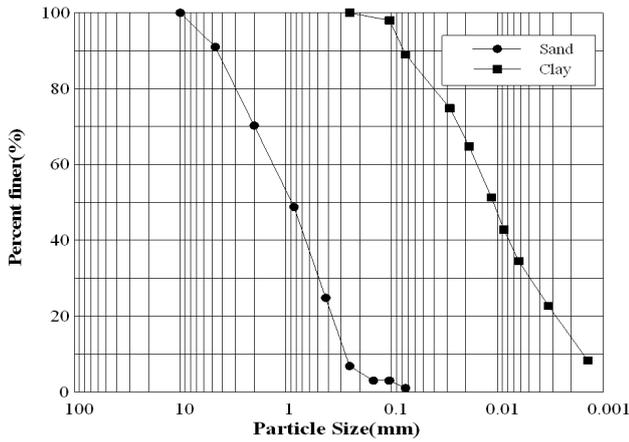


Fig. 1. Grain distribution of specimens

간극수압이 작아지거나 소산될 경우 심벽 재료의 강도 또한 줄어들게 되어 구조물 자체의 안정성에도 영향을 미치게 된다. 이러한 특성 때문에 제방 및 댐 등 지반구조물의 안정성 평가를 위해서는 지반재료의 간극수압의 변화에 따른 전단강도의 특성을 고려하여야 한다(Korea Institute of Construction Technology, 2007). Choi et al.(2008)은 국내에서 발생하는 하상토의 지반재료로 활용을 위한 기초연구로서 하상재료의 침투특성 평가와 안정성 평가를 수행하여 안정처리 방안을 제안하였다.

지반재료의 불포화 특성은 제방이나 소규모 댐의 침투 특성 뿐만 아니라 강도특성에도 중요한 영향을 미치고 있다. 따라서 제방 구조물의 안정성 유지와 지속적인 관리를 위하여 재료의 불포화 특성을 제대로 파악할 수 있어야 한다. 최근들어 국내에서도 지반공학분야에서 불포화 영역에 대한 관심이 증가하고 있으며 지반재료의 불포화 특성 평가를 위한 실험적 연구가 진행되고 있다(Lim, 2007; Kim and Kim, 2008; Song et al., 2012; Kim et al., 2013; Song, 2014). 본 연구에서는 국내 하천 유역에서 발생하는 하상재료인 모래, 점토의 불포화 전단강도특성을 분석하여 제방 등 인근 현장에서 시공되는 지반구조물의 지반재료로 적용시 안정성 검토 및 설계시공에 적용할 수 있는 기초자료를 제공하고자 한다. 이를 위해 불포화 전단강도 특성을 살펴보기 위해 국내하천에서 하상재료로 쉽게 구할 수 있는 대표적인 시료인 낙동강 유역 모래(SP)와 만경강 유역에서 채취한 점토(CL) 시료에 대한 불포화 삼축실험을 수행하였다. 본 연구에서는 불포화 전단강도 특성의 공학적 평가를 위해 기제안된 전단강도식에서 볼 수 있는 바와 같이 임의의 조건을 가진 시료의 불포화 전단강도는 기존 포화전단 강도 정수인 c' 와 ϕ' , 그리고 최대 겔보기

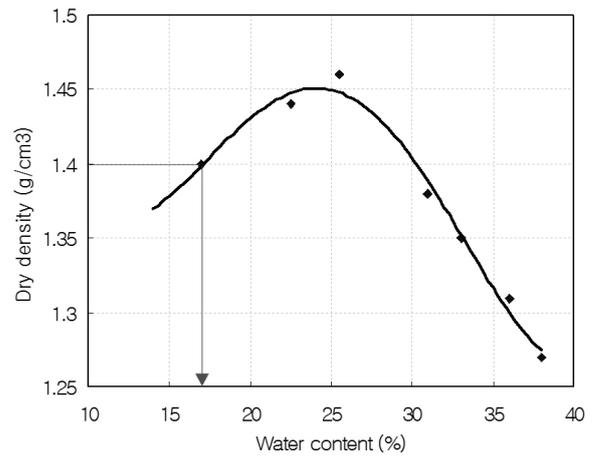


Fig. 2. Compaction curve of clay specimen

점착력 증분을 나타내는 경험적인 계수인 C_{max} 를 이용하여 표현되어 질 수 있음에 따라 실험을 통해 포화 강도정수인 c' 와 ϕ' 을 구하였다. 그리고 모관흡수력 변화에 따른 강도 변화를 살펴보기 위해 다단계 실험방법(multi-stage test)을 적용하였으며, 그 결과를 비선형성을 고려한 겔보기 점착력 식(C_{max} 이용)에 맞추어 비교분석하였다. 또한 실험결과를 바탕으로 선형적인 강도 정수를 보여주는 Mohr-Columb 파괴강도를 활용할 수 있는 평균적인 ϕ^b 값을 산출하였다.

2. 불포화 전단강도 실험

2.1 대상시료 및 시료성형

본 연구에서는 국내에 하상지역에 가장 널리 분포해 있는 하상재료 중 제방 및 제체재료를 구성하고 있는 대표적인 시료인 모래(SP)와 점토(CL)를 대상으로 실험을 수행하였다. 실험을 위해 모래는 낙동강 유역에서 채취하였으며, 점토는 만경강 지역에서 채취 하였다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 시료의 입도분포 곡선을 나타내고 있다. 삼축 압축실험을 위해 시료의 크기는 직경 50mm와 높이 100mm 로 제작하였다. 모래시료의 입도분포곡선에서 알 수 있듯이 입경 5.0mm~10mm의 시료가 10%정도로 나타나고 있으나 공시체의 직경 50mm로 사용시 입경에 의한 영향이 크게 미치지 않을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 대상 시료의 다짐시험 등 기본물성실험, 포화 삼축 실험 및 불포화 삼축실험을 수행하였다.

Fig. 2는 점토시료에 대한 다짐시험 결과를 나타내고 있다. 다짐시험 결과 점토시료는 최대건조밀도가 1.46g/cm^3 ,

Table 1. Properties for specimens

	Dry density (g/cm ³)	Water content (%)
Clay	1.4	17
Sand	1.8	8

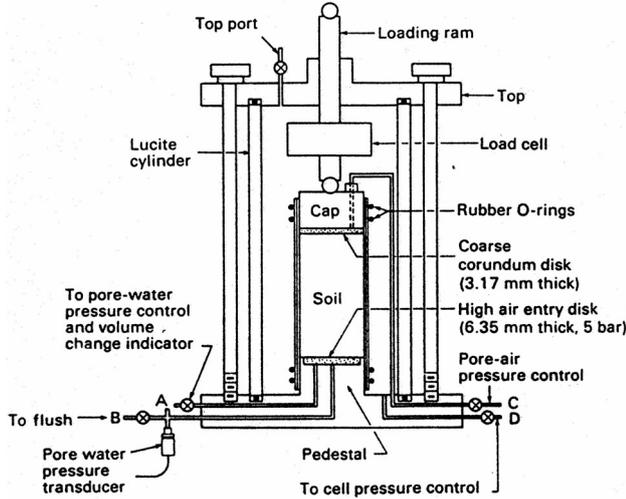


Fig. 3. Modified unsaturated triaxial compressive test equipment

최적함수비가 26%로 나타났다. 본 시료에 대해 삼축실험을 수행하기 위한 시료를 성형하기 위하여 일반적인 시료 성형조건인 최대건조밀도의 95%에 해당하는 건조밀도와 이에 해당하는 건조 축 함수비를 구하였다. Table 1은 점토와 모래시료의 성형 조건을 보여주고 있으며 각 시료에 해당하는 건조밀도와 함수비로 다짐을 통해 높이 100mm, 직경 50mm의 원통형 시료를 제작하였다.

2.2 실험장치 및 실험방법

삼축압축실험은 실험실에서 흙의 전단강도를 측정하기 위해 사용하는 가장 보편적인 실험으로 본 연구에서는 불포화 조건을 만족시켜주면서 불포화지반의 강도를 얻기 위한 방법으로 기존의 삼축압축실험장치를 개조한 실험장치를 사용하였다(Fig. 3). 실험방법은 간극수와 간극공기를 모두 배수상태로 하는 압밀배수시험(CD)을 수행하였다. 시료에 모관흡수력을 유발시키기 위해서는 음의 간극수압을 유지시키도록 해야 하지만 실제로는 음의 간극수압을 1기압까지밖에 발생시킬 수 없어 실험을 위해서 축변환기법(axis-translation technique)을 사용하였다. 이는 간극수압을 양의 값으로 시료의 받침대를 통해 작용시키고 그와 더불어 간극공기압을 간극수압 증가량만큼 증가

된 값으로 시료의 cap을 통해 작용시켜 실제 시료에 작용되는 모관흡수력($u_a - u_w$)은 일정하게 유지하였다. 이를 위해서는 간극공기압과 간극수압을 각각 독립적으로 조절할 수 있어야 하므로 5기압(bar)의 공기압까지 공기를 통과시키지 않고 물의 연속성을 유지시킬 수 있는 높은 공기함입치(air entry value)를 갖는 세라믹 디스크를 시료의 받침에 설치하였다. 시료의 압밀과정은 구속압, 간극공기압, 간극수압의 작용으로 이루어진다. 밀판에 작용되는 수압은 트랜스듀서에 기록된다. 압밀과정은 시료로부터의 물의 배출이나 전체적인 부피변화가 더 이상 일어나지 않을 때 평형조건에 도달한 것으로 가정한다. 작용된 압력하에서 평형조건을 얻었을 때 시료는 적절한 변형률 속도로 압축에 의해 전단된다. 시료에 작용되는 축하중의 크기는 로드셀을 사용하여 기록될 수 있고, 축하중은 축차응력으로 전환된다. 전단과정은 간극공기와 간극수에 대해 배수 조건하에서 실행된다. 전단과정은 선택된 파괴규준(e.g. 최대축차응력)에 도달하였을 때 끝나게 된다.

시료에 대한 균질성을 유지하기 위해 하나의 시료에 대해 여러 모관흡수력 단계에 대해 실험하는 다단계(multistage) 실험 방법을 채택하여 실험하였다(Fredlund and Rahardjo, 1995). 다단계(multistage) 실험의 경우에 위의 과정(즉, 압밀과 전단)은 각 단계에서 반복된다. 이때 각 단계를 위한 압밀은 0의 축차응력에서 시작하거나 이전의 단계로부터 얻어진 최대 축차응력을 유지시키면서 시작할 수 있다. 즉 축하중을 0으로 풀어줌으로써 축차응력을 0으로 가져갈 수 있다. 각 단계에서 전단과정은 마지막 단계를 제외하고 최대축차응력에 도달하는순간 멈추어야 한다.

불포화토의 강도실험은 보통 일정한 변형률 속도(strain rate)로 수행되고, 적절한 변형률 속도는 실험시작 전에 선택되어야 한다. 비배수 전단실험에서는 선택된 변형률 속도가 시료 전체에서 유발되는 간극수압의 균일성(equalization)을 확보해야 하고, 배수 전단실험에서는 선택된 변형률 속도가 유발되는 간극수압의 소산(dissipation)을 확보해야 한다. 실험을 위한 변형률 속도의 평가는 일부 이론의 기초와 일부 경험적 검증의 기반 위에서 이루어져야 한다. 본 연구에서는 이전 연구자들에 의해 추천된 지반재료에

대한 변형률 속도를 고려하여 0.004(mm/min)의 변형률 속도를 선정하여 실험을 수행하였다(Lee et al., 2002). 이때 각 모관흡수력 단계에서 얻어진 최대축차 응력 상태로부터 파괴시 모아윈(Mohr circle)을 얻을 수 있다. 포화시료의 배수 삼축압축실험에서 구한 내부마찰각(ϕ')의 기울기로 각각의 모아윈들에 접하는 직선과 모관흡수력-전단강도 면이 만나는 점들로부터 점착력(apparent cohesion)을 구할 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 포화삼축실험

본 연구에서는 점토, 모래 시료에 대한 포화 삼축실험을 수행하여 강도정수를 산정하였다. 구속조건은 50kPa, 100kPa, 150kPa로 세 조건으로 나누어 실험을 수행하였다. Fig. 4는 구속조건에 따른 응력-변형률곡선을 보여주고 있으며, Mohr-Coulomb 파괴포락선을 통해 Mohr-Coulomb 원이 커지면서 파괴 전단강도도 증가하는 것을 알 수 있

다. $\tau = c' + \sigma \tan \phi'$ 수식을 이용한 포화강도는 순응력이 150kPa 일 때 모래 시료의 경우 126kPa, 점토시료는 98kPa로 SP시료의 포화 강도가 크게 나타났다. 점착력을 살펴보면 점토시료는 점착력이 12kPa, 모래 시료는 5kPa로 나타났다. 내부마찰각은 모래 시료가 38.8 °로 점토시료의 29.8 °보다 크게 나타났다.

3.2 불포화 삼축실험

본 연구에서는 불포화 삼축실험을 수행하였으며 모관흡수력 변화에 따른 강도증가 효과를 고찰하였다. 불포화 삼축실험은 시료성형에 따른 불확실성을 줄이기 위하여 동일한 시료를 대상으로 여러 모관흡수력 단계에서 전단 실험을 수행하는 다단계 실험(multi-stage test)을 채택하였다. Fig. 5(a)는 점토시료의 모관흡수력 변화에 따른 응력-변형률곡선을 보여주고 있는데 모관흡수력이 증가함에 따라 축차응력도 증가하는 경향을 보이고 있다. 그림 Fig. 5(b)는 모래(SP)시료의 모관흡수력 변화에 따른 응력-변형률 경향을 나타내고 있는데 모관흡수력 증가에 따른 강

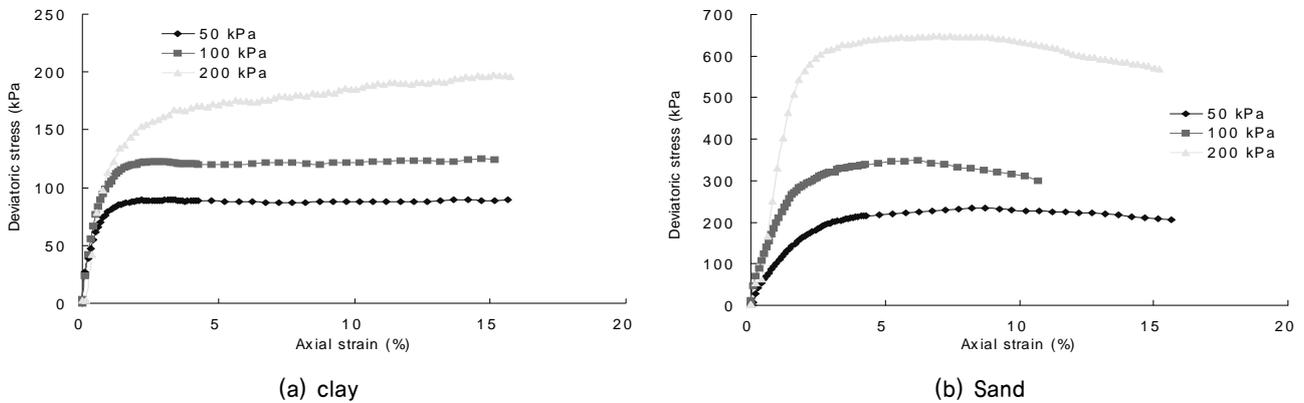


Fig. 4. The relation between axial strain and deviator stress

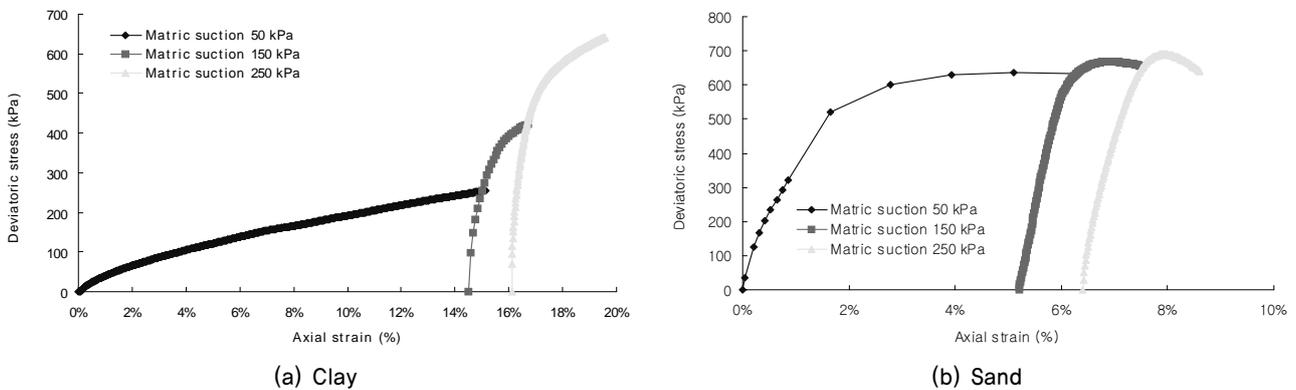


Fig. 5. The axial strain and deviator stress according to matric suction

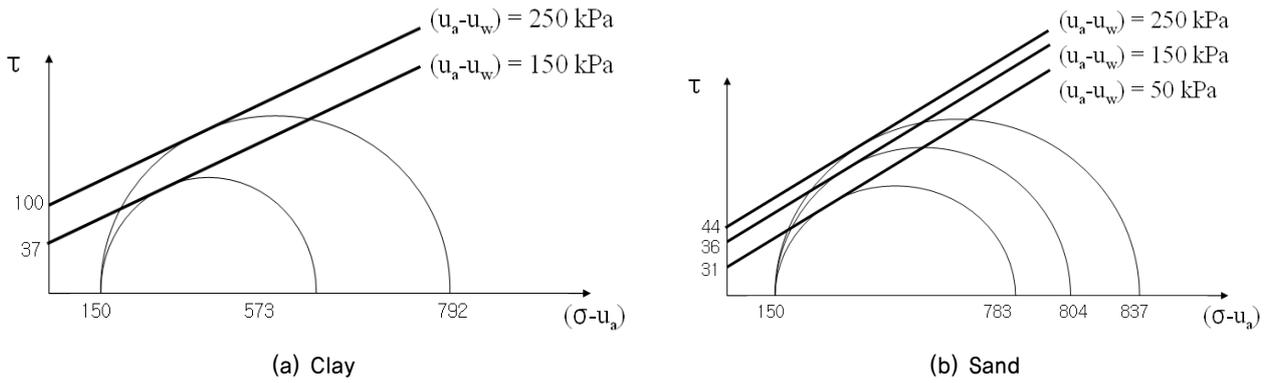


Fig. 6. Mohr-Coulomb failure envelopes

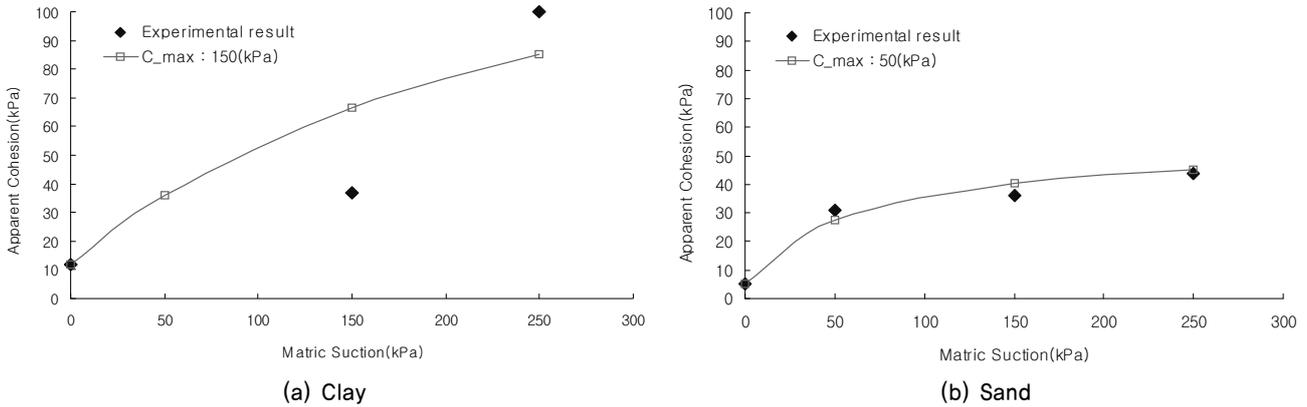


Fig. 7. Apparent cohesion according to matric suction

도의 증가가 점토시료에 비해 크게 나타나지 않았다. 이러한 이유는 모래 성분이 많은 흙의 경우 내부 간극의 크기가 크기 때문에 공기함입치가 작아서 낮은 모관흡수력에서도 시료 내부의 수분이 많이 빠져 나가게 된다. 즉 공기함입치가 5kPa 내외로 아주 작기 때문에 50kPa 이상의 모관흡수력을 유발한 실험에서는 이미 수분이 대부분 빠져 나가 모관흡수력 증가에 따른 강도증가 효과가 나타나기 어려움을 의미한다. Fig. 6은 실험 결과를 Mohr-Coulomb 파괴포락곡선으로 표현한 것이다. Mohr-Coulomb 원이 커지면서 파괴전단강도도 증가하고 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 파괴포락선의 기울기는 내부마찰각을 의미한다.

Fig. 7은 Lee et al.(2002)이 겉보기 점착력의 거동을 간단한 형태로 표현할 수 있도록 제안한 쌍곡선식을 이용하여 모관흡수력에 따른 겉보기 점착력을 표현하는 곡선을 보여주고 있다. Fig. 7 (a)는 점토의 겉보기 점착력 거동을 보여주고 있는데 모관흡수력에 따른 겉보기 점착력이 크게 증가하는 것으로 나타나고 있으며, 이 때 C_{max} 값은 150을 설정하였을 때 실험결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있

다. 모관흡수력이 150kPa까지 증가하는 동안 발생한 겉보기 점착력의 증가량보다 150kPa에서 250kPa로 증가하면서 발생한 겉보기 점착력의 증가량이 더 크게 나타난 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 점토질 흙에서는 시료 내부의 물이 빠지는 모관흡수력, 즉 공기함입치(air entry value)가 크기 때문에 모관흡수력이 150kPa까지는 높은 함수비 상태를 유지하면서 강도가 크게 증가하지 않지만 공기함입치를 넘어서면서 시료 내부 함수비가 감소함에 따라 시료의 강도를 크게 증가시키고 있음을 의미한다. Fig. 7 (b)는 모래의 겉보기 점착력을 보여주고 있는데 점토시료에 비해 모관흡수력 증가에 따른 점착력의 증가가 크게 나타나지 않음을 알 수 있다. 또한 C_{max} 값은 50으로 나타나 모관흡수력에 따른 강도증가가 크게 나타나지 않음을 알 수 있다.

또한 실험결과로부터 얻어진 겉보기 점착력(CA) 값으로부터 수정된 Mohr-Coulomb 파괴포락선에 표현되는 모관흡수력의 영향 정도를 나타내는 겉보기 마찰각(ϕ^b)으로 표현하면, Fig. 8(a)는 점토시료의 경우 모관흡수력이 0 kPa인 경우 ϕ^b 는 30°에서 250kPa인 경우 16°로 감소하는 비선형성을 보여주고 있다. Fig. 8(b)는 모래시료의 실험

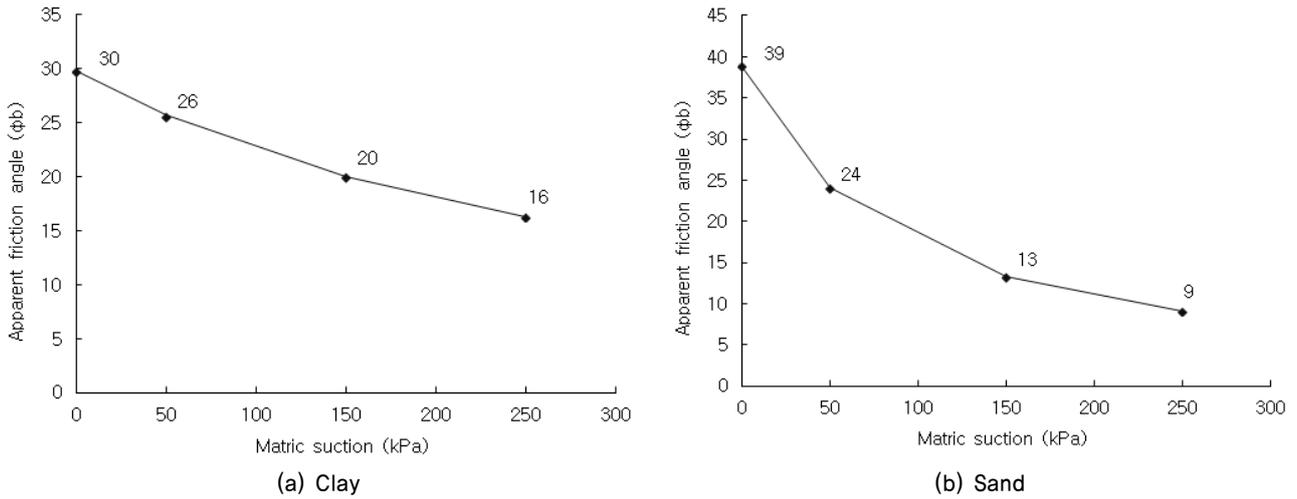


Fig. 8. Apparent friction angle (ϕ^b) according to matric suction

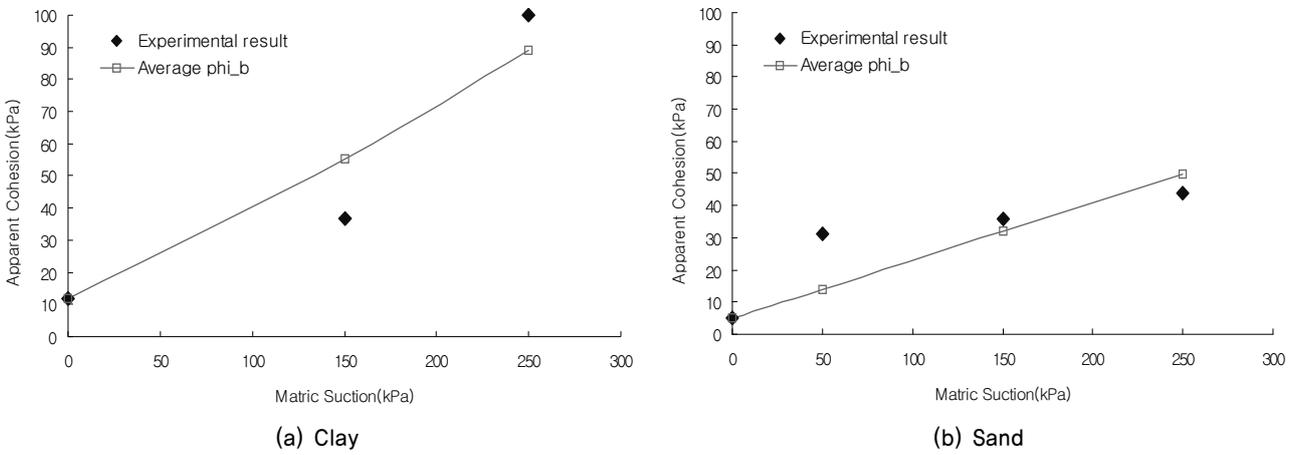


Fig. 9. Average apparent friction angle (ϕ_{avg}^b) according to matric suction

Table 2. Strength parameter of specimens

	c' (kPa)	ϕ^s (°)	$(\sigma - u_a)$	C_{max}	ϕ_{avg}^b (°)
Clay	12	29.8	150	150	19
Sand	5	38.8	150	50	10

결과를 나타내고 있는데 모관흡수력과 관련된 지반정수인 겉보기 마찰각(ϕ^b)의 값의 변화가 39°에서 9° 급격히 줄어들어 결국 모관흡수력 증가에 따른 강도증가 효과가 크지 않음을 나타내고 있다.

Fig. 9에서는 모관흡수력에 따른 겉보기 점착력의 변화를 선형으로 가정하여 점착력(c')을 지나는 최적화된 ϕ_{avg}^b 값을 산정하였다. 산정된 ϕ_{avg}^b 값은 점토의 경우 19°이며, 모래는 10°로 나타났다. 이 값은 ϕ^b 값을 ϕ' 와 동일하게 가정하였을 경우 불포화 전단강도가 과도하게 산정되는 것을 줄일 수 있으며, 선형적인 강도값을 입력변수로 이용하는 수치해석프로그램에 효율적으로 활용할 수 있을 것

으로 판단된다. Table 2는 포화삼축시험 및 불포화 삼축시험을 통해 측정된 강도정수를 나타내고 있다.

4. 결론

본 논문에서는 지반재료로 사용되고 있는 국내 하상 퇴적토인 모래와 점토시료를 대상으로 지반구조물의 합리적인 안정성 판단 및 설계를 위한 기초자료로 활용하고자 불포화삼축압축시험을 수행하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 국내 발생 하상토인 모래와 점토를 대상으로 모관흡수력을 증가시키면서 강도를 얻는 다단계실험(multi-stage triaxial testing)을 수행한 결과, 모관흡수력이 증가함에 따라 강도 또한 증가함을 알 수 있다. 모관흡수력 증가에 따른 불포화 강도의 증가는 Clay 시료에서 크게 나타나고 있는데, 이것은 Clay 시료의 공기함입치가 커서 시료 내부의 수분이 높은 모관흡수력 상태에서 빠져 나오기 때문이다.
- (2) 본 연구에서는 모관흡수력에 따른 강도정수의 변화를 보여주기 위해 쌍곡선식을 이용한 겔보기 점착력의 표현식을 적용하였으며, 실험결과를 통해 시료별 모관흡수력 변화에 따른 ϕ^b 의 비선형성을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.
- (3) 겔보기 점착력의 비선형성을 보여주는 C_{max} 값의 경우 Clay 시료에서 150으로 나타났고, SP 시료의 경우 50으로 나타났다. 강도의 비선형성을 고려할 수 없을 경우, 수정된 Mohr-Columb 강도식에서 활용할 수 있는 ϕ_{avg}^b 값은 Clay 시료의 경우 15° ; SP 시료는 19°로 나타났다.
- (4) 국내 하상재료를 널리 분포하며 기반재료로 사용되는 점토와 모래에 대한 불포화 전단특성 평가를 통해 지반구조물 안정성 평가 및 해석을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgement

This research was supported by a grant from Ministry of Land, Infrastructure and Transport. The authors are very grateful thanks to the cooperation of KAIST Geotechnical Lab.

References

1. Choi, B. H., Kim, K. M., Kim, J. M. and Lee, D. Y. (2008), "Seepage Characteristics of Domestic Bed Sediments Mixed with Good-quality Soil as Levee Fill Material", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.10, pp.105-111.
2. Lee, S. J., Lee, S. R. and Jang, B. S. (2002), "Unsaturated Shear Strength Characteristics of Weathered Granite Soils", *Journal of Korea Society of Civil Engineers-C*, Vol.22, No.1, pp.81-88.
3. Lim, S. Y. (2007), "The Shear Characteristics Unsaturated Sandy Soils", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.10, pp.57-64.
4. Korea Institute of Construction Technology. (2007), *A Study on Levee Construction Method using Bed Sediment*, Korea Institute of Construction and Transportation Technology Evaluation and Planning, R&D Final Report.
5. Kim, Y. S. and Kim, D. M. (2008), "Characteristics of Undrained Cyclic Shear Behavior of Nak-Dong River Sand by Silt Contents", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.11, pp.79-89.
6. Kim, G. I., Shin, J. S., Park, S. S. and Kim, K. Y. (2013), "Unsaturated Shear Strength Characteristics of Nak-Dong River Silty Sand", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.2, pp.47-56.
7. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1995), *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons Inc.
8. Song, Y. S., Hwang, W. K., Jung, S. J. and Kim, T. H. (2012), "A Comparative Study of Suction Stress between Sand and Silt under Unsaturated Conditions", *Engineering Geology*, Vol.124, pp.90-97.
9. Song, Y. S. (2014), "Suction Stress in Unsaturated Sand at Different Relative Densities", *Engineering Geology*, Vol.176, pp.1-10.