

공시체의 직경이 사질토의 비배수 및 배수 전단거동에 미치는 영향

Effect of Specimen Size on Undrained and Drained Shear Characteristics of Granular Soils

박 성 식¹ Park, Sung-Sik

최 선 규² Choi, Sun-Gyu

김 동 락² Kim, Dong-Rak

Abstract

An internal friction angle, which is one of strength parameters of granular soils, can be obtained from direct shear tests or triaxial tests. The result of triaxial tests can be influenced by various experimental conditions such as confining pressure, shearing rate, specimen diameter and height, and end constraint. In this study, undrained and drained shearing behaviors of Nakdong River sand were investigated for loose ($Dr = 40\%$) and dense ($Dr = 80\%$) specimens with 5, 7, and 10 cm in diameter. Friction angles such as undrained total stress friction angle, undrained effective stress friction angle, and drained friction angle obtained from Mohr's stress circle slightly increased and then decreased as a diameter of a specimen increased from 5, 7 to 10 cm, regardless of relative densities. The difference between friction angles caused by different specimen size was at maximum 4.5 degrees for undrained total stress friction angle of dense specimen. In most cases, there was little difference between friction angles of large and small specimens, which was less than 2 degrees. The difference between an effective friction angle from undrained tests and a drained friction angle from drained tests was at maximum 7 degrees for loose samples but negligible for dense samples.

요 지

사질토의 전단강도정수 중의 하나인 내부마찰각은 일반적으로 직접전단시험 또는 삼축압축시험으로 구할 수 있다. 한편 삼축압축시험 결과는 구속압, 전단속도, 공시체의 직경이나 높이, 단부조건 등과 같은 다양한 공시체 및 실험 조건에 의해 영향을 받는다. 본 연구에서는 낙동강모래로 직경이 5, 7, 10cm인 느슨한(상대밀도 40%) 및 조밀한(상대밀도 80%) 공시체를 만든 다음 배수 및 비배수 전단시험을 실시하여 공시체의 직경이 모래의 배수 및 비배수 전단강도에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. Mohr-응력원으로 부터 구한 마찰각은 상대밀도에 관계없이 비배수 전응력마찰각, 비배수 유효응력마찰각 및 배수마찰각 모두 공시체의 직경이 5, 7, 10cm로 증가함에 따라 약간 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보였다. 앞서 언급한 세 종류 마찰각에서 공시체 직경에 따른 각각의 마찰각 차이는 비배수시험에서 얻은 조밀한 공시체의 전응력마찰각이 4.5도로 가장 큰 차이를 보였으나, 나머지는 2도 이내의 미미한 차이를 나타내었다. 한편 비배수시험에서 얻은 유효응력마찰각과 배수시험에서 얻은 배수마찰각을 비교하였을 때 느슨한 공시체의 경우에는 최대 7도 정도 차이가 났으나 조밀한 공시체의 경우에는 거의 차이가 나지 않았다.

Keywords : Diameter, Drainage condition, Friction angle, Sand

1 정회원, 경북대학교 공과대학 건축토목공학부 토목공학전공 조교수 (Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyungpook National Univ., sunpark@knu.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 경북대학교 공과대학 건축토목공학부 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kyungpook National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

흙의 파괴 여부를 판단하는 기준으로 Mohr-Coulomb 파괴규준이 일반적으로 많이 사용되고 있으며, 점착력과 마찰각이 흙의 파괴 여부를 결정하게 된다. 점착력이나 마찰각과 같은 강도정수는 일반적으로 직접전단시험이나 삼축시험으로 구할 수 있다. Cerato와 Lutenegger (2006)는 크기가 다른 세 종류의 전단박스를 이용한 직접전단시험에서 모난 모래의 마찰각이 상대밀도에 관계없이 공시체 크기에 따라 큰 영향을 받는다는 연구결과를 발표하였다. 또한 삼축시험에서도 직경이 5cm 또는 7cm인 공시체를 사용하여 이와 같은 강도정수를 구하고 있지만 이와 같은 직경의 크기가 강도정수 결정에 어떤 영향을 미칠 수 있다. Goto와 Tatsuoka(1988)에 의하면 Toyoura sand를 사용하여 공시체 높이와 직경의 비가 각각 63cm/30cm, 15cm/7cm인 시료에서 공시체의 직경이 증가함에 따라 조밀한 공시체의 강도는 증가하고 느슨한 공시체의 강도는 감소하는 경향을 보였다. 즉, 조밀한 공시체의 경우 마찰각이 43.3도에서 44.5도로 증가하였다. 박성식과 김영수(2011)도 직경이 5cm와 10cm인 공시체를 사용한 비배수 삼축시험에서 비배수 전응력마찰각이 35.5도에서 36.2도로 약 1도 증가하는 Goto와 Tatsuoka(1988)와 유사한 결과를 얻었다.

하지만 입자 간의 마찰력이 강도를 지배하는 모래와 달리 입자 간의 점착력이 지배적인 요소인 점토나 암석의 경우는 높이와 직경의 비가 2로 동일하고 직경이 2.2, 3.5, 5.0cm인 공시체에 대한 점토의 압밀 비배수 삼축압축시험에서 축차응력을 비롯하여 과잉간극수압은 거의 차이가 나지 않았다(Nabeshima 등, 1999). Ikemi 등 (1998)도 이암에 대한 압밀 비배수시험에서 공시체의 크기가 실험 결과에 크게 영향을 미치지 않는다는 결론을 얻었다. 한편 Goto와 Tatsuoka(1988)의 실험결과에 의하면 공시체의 밀도에 관계없이 공시체 크기가 대형일수록 초기 강성이 크게 나타났다. 하지만 박성식과 김영수(2011)의 축차응력-축변형률 곡선에서 초기 탄성부분의 기울기(접선 기울기)가 나타내는 강성(stiffness)은 공시체의 직경 증가에 따라 약간 감소하는 경향을 보였다. 이와 같은 차이는 비록 동일한 상대밀도를 가진 공

시체라도 초기의 응력-변형률 거동은 시료의 성형방법이나 모래의 조직(fabric)에 따라 상당한 차이를 나타낼 수 있기 때문이다(Vaid 등, 1995; Vaid와 Sivathayalan, 2000).

본 연구에서는 공시체 직경이 5, 7, 10cm인 공시체에 최대입경이 0.425mm 이하인 모래를 사용하여 배수 및 비배수 전단시험을 실시하여 공시체의 직경이 모래의 배수 및 비배수 전단강도에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

2. 공시체 제작방법 및 종류

2.1 실험재료

본 연구에서는 낙동강모래를 사용하였으며, 낙동강 모래의 전자현미경 사진은 그림 1과 같다. 모래 입자는 약간 모난 형태를 하고 있으며 색깔은 다소 붉은 색을 띠고 있다. 낙동강모래의 성분분석 결과에 의하면 낙동강모래는 실리카(이산화규소)가 78% 이상인 실리카질 모래이다. 삼축압축시험에서 공시체의 직경은 실험에 사용하는 입자의 최대 크기보다 10배 이상이 되도록 권장하고 있으므로 최대입경이 0.425mm 이하인 모래를 사용하였다. 기본 물성치는 표 1과 같으며, 그림 2는 입도분포곡선을 나타내고 있으며 통일분류법에 의해 빈 입도 모래(SP)로 분류된다. 낙동강모래의 최대간극비와 최소간극비는 각각 1.181과 0.65이다.

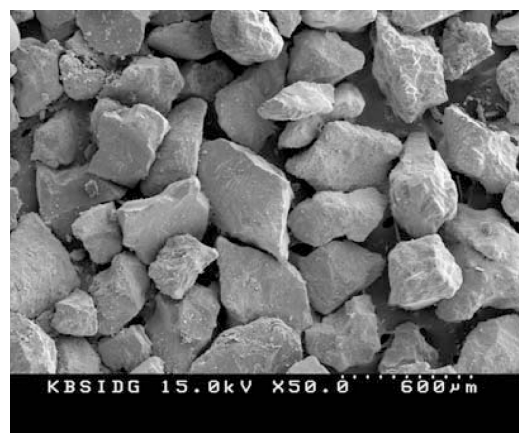


그림 1. 낙동강모래의 전자현미경 사진

표 1. 낙동강모래의 기본 물성치

Specific gravity G_s	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	C_u	C_c	e_{max}	e_{min}	USCS
2.637	0.19	0.24	1.32	1.04	1.181	0.65	SP

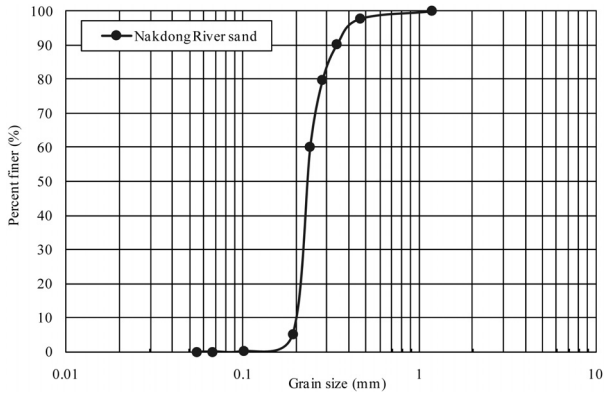


그림 2. 낙동강모래의 입도분포곡선

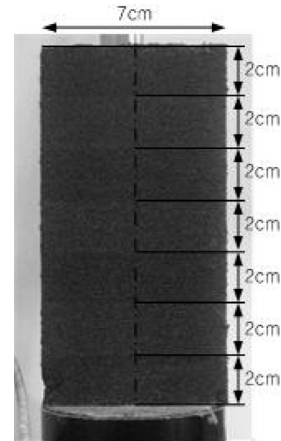


그림 3. 층별로 균일한 건조밀도가 되도록 제작된 공시체

2.2 공시체 제작 및 종류

공시체 제작은 먼저 삼축셀의 아래쪽 받침(pedestal)에 멤브레인을 설치하고 멤브레인을 성형몰드 내에 부착시킨 다음 몰드 내로 동일한 양의 습윤상태 모래를 넣고 램머를 이용하여 한 층을 다진 다음 반복해서 다음 층을 완성하는 방식으로 실시하였다. 공시체의 종류(직경 크기)에 따라 공시체를 5층, 7층, 또는 10층으로 나누고, 각 층에 들어간 동일한 양의 습윤상태 모래는 그림 3(직경이 7cm인 경우)과 같이 최종적으로 층당 2cm가 되도록 다짐하였다. 경험적으로 아래층을 조금씩 덜 다지는 방식을 사용하였으며, 아래층으로 갈수록 층당 다짐깊이를 조금씩 높게 램머에 표시하여 이를 기준으로

다짐을 실시하였다. 건조밀도는 공시체의 상대밀도가 40% 정도인 느슨한 공시체에 해당하는 1.306g/cm^3 와 80%인 조밀한 공시체에 해당하는 1.494g/cm^3 가 되도록 다짐도를 조절하여 공시체를 제작하였다. 다짐횟수나 다짐에너지를 달리하여 원하는 건조밀도가 되도록 제작하였다. 직경이 5cm(높이 10cm), 7cm(높이 14cm) 및 10cm(높이 20cm)인 공시체를 제작하였으며, 각각의 공시체를 ‘소형’, ‘중형’, ‘대형’이라 하였다.

공시체 제작이 완성되면 이산화탄소를 장시간 흘려 보낸 후 공시체의 하부로 물을 주입한 다음 시료에 배압(back pressure)을 가하여 포화시켰다. 시료의 교란 방지를 위하여 구속압과 배압의 차이를 5kPa로 유지하면서 배압을

표 2. 압밀배수(CD) 삼축압축시험 조건 및 결과

Test ID	Confining pressure (kPa)	Condition	Specimen Diameter (mm)	Dry density after consolidation (g/cm^3)	Max. deviator stress (kPa)	Axial strain at Peak strength (%)
CD-50-L1	50	Loose	50	1.310	126	13.85
CD-50-L2			70	1.319	137	14.17
CD-50-L3			100	1.308	115	13.96
CD-50-D1		Dense	50	1.499	262	1.38
CD-50-D2			70	1.500	267	1.83
CD-50-D3			100	1.497	206	3.75
CD-100-L1	100	Loose	50	1.313	259	14.97
CD-100-L2			70	1.314	263	13.14
CD-100-L3			100	1.312	230	13.17
CD-100-D1		Dense	50	1.501	423	2.93
CD-100-D2			70	1.501	461	3.66
CD-100-D3			100	1.498	378	4.13
CD-200-L1	200	Loose	50	1.315	489	14.99
CD-200-L2			70	1.316	521	14.89
CD-200-L3			100	1.315	461	14.99
CD-200-D1		Dense	50	1.501	756	4.13
CD-200-D2			70	1.501	776	5.70
CD-200-D3			100	1.500	695	5.74

300kPa까지 점차적으로 가하면서 최종적으로 B값이 0.96 이상 되도록 하였다. 포화과정이 완료되면 구속압 σ'_3 를 50, 100, 200kPa로 등방압밀시킨 다음 배수 및 비배수 전단시험을 실시하였으며, 각각의 실험조건은 표 2 및 3과 같다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 공시체의 크기에 따른 축차응력 비교

정해진 구속압으로 압밀이 완료되면 비배수시험의

경우 0.1%/min의 속도로 축변형률 15%까지 전단시험을 실시하였다. 배수시험의 경우는 과잉간극수압이 발생하지 않도록 0.05%/min의 속도로 축변형률 15%까지 전단시험을 실시하였다. 한편 배수시험에서 전단속도는 최대축차응력 시 축변형률(ϵ_{af})이 예측 가능할 경우 전단속도는 $\epsilon_{af}/15t_c$ (t_c 는 압밀시간)과 같이 구할 수 있으며, 본 연구에서는 전단속도에 따른 축차응력(deviator stress, $q = \sigma_1 - \sigma_3$)의 차이는 크지 않았다. 공시체의 압밀 전 상대밀도가 약 40%인 느슨한 공시체는 압밀로 인하여 상대밀도가 1-3% 정도 증가하였다. 하지만 압밀 전 상대

표 3. 압밀비배수(CU) 삼축압축시험 조건 및 결과

Test ID	Confining pressure (kPa)	Condition	Specimen Diameter (mm)	Dry density after consolidation (g/cm^3)	Max. deviator stress (kPa)	Axial strain at Peak strength (%)
CU-50-L1	50	Loose	50	1.310	43	0.88
CU-50-L2			70	1.310	49	1.15
CU-50-L3			100	1.309	41	0.69
CU-50-D1		Dense	50	1.499	796	13.97
CU-50-D2			70	1.499	871	15
CU-50-D3			100	1.497	817	15
CU-100-L1	100	Loose	50	1.313	62	1.18
CU-100-L2			70	1.314	71	1.67
CU-100-L3			100	1.313	61	0.76
CU-100-D1		Dense	50	1.501	970	15
CU-100-D2			70	1.500	1024	12.15
CU-100-D3			100	1.498	996	14.25
CU-200-L1	200	Loose	50	1.317	121	2.29
CU-200-L2			70	1.316	140	15
CU-200-L3			100	1.315	116	15
CU-200-D1		Dense	50	1.502	1146	14.67
CU-200-D2			70	1.501	1243	14.78
CU-200-D3			100	1.500	1124	13.53

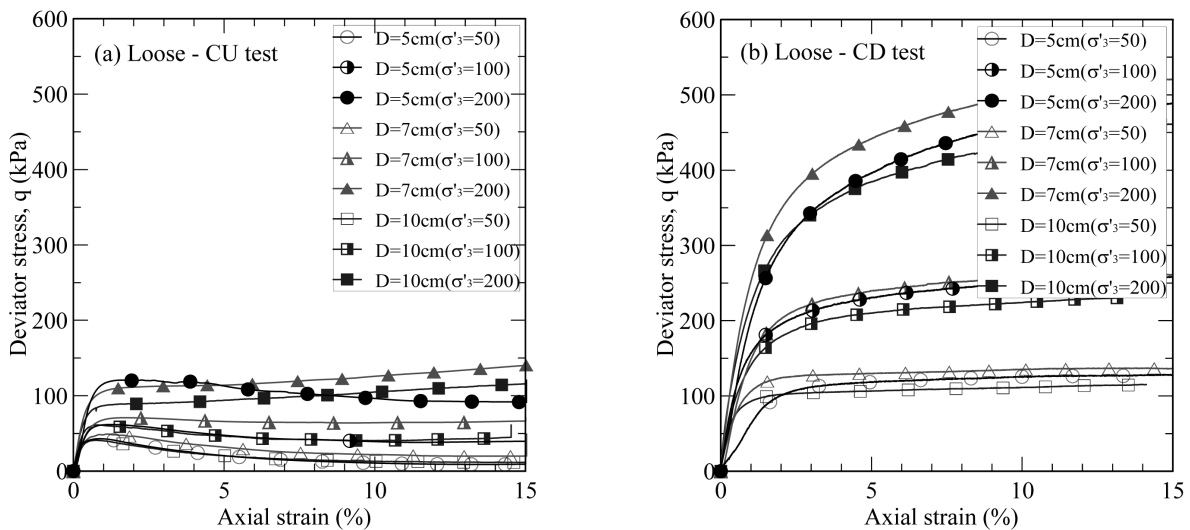


그림 4. 느슨한 공시체의 직경에 따른 비배수(a) 및 배수시험(b)의 축차응력-축변형률 관계

밀도가 80%인 공시체는 압밀 후에 1% 정도의 무시할 만큼의 상대밀도 증가가 발생하였다. 본 연구에서는 공시체의 직경은 세 종류이지만 높이와 직경의 비는 2로 모두 동일하다.

그림 4(a)와 4(b)는 느슨한 공시체에 대한 각각 비배수(CU) 및 배수(CD) 전단시험 결과로 세 종류의 구속압에 대하여 공시체 직경(직경 5cm는 동그라미, 7cm는 세모, 10cm는 네모로 표시)에 따른 축차응력-축변형률 관계를 비교하였다. 느슨한 공시체의 비배수상태 응력-변형률 거동은 최대축차응력이 비교적 뚜렷이 나타나는 경향을 보이지만, 배수상태의 경우에는 최대축차응력이 뚜렷이 나타나지 않고 축차응력이 서서히 증가하는 경화현상을 보였다. 이와 같은 경화현상으로 비배수시험보다 배수시험에서 얻은 축차응력이 훨씬 더 높은 값을 나타내었다. 한편 동일한 구속압에서 비배수 및 배수시험 모두 소형에서 중형으로 공시체의 직경이 증가함에 따라 축차응력이 약간 증가하지만 대형공시체의 경우에는 소형공시체보다 오히려 감소하는 경향을 보였다. 이것은 공시체 직경 증가에 따른 모래 입자끼리의 마찰력 감소를 비롯하여 직경이 커지면서 상대적으로 가는 모래 입자가 많이 포함되어 최대축차응력이 감소한 것으로 판단된다.

그림 5(a)와 5(b)는 조밀한 공시체에 대한 각각 비배수 및 배수 전단시험의 축차응력-축변형률 결과이다. 조밀한 공시체의 비배수시험의 경우 최대축차응력이 뚜렷하게 나타나지 않고 응력이 지속적으로 증가하는 경화현상을 보이지만 배수시험의 경우에는 최대축차응력

이 뚜렷이 나타났다. 즉, 느슨한 공시체와는 서로 반대되는 응력-변형률 거동을 보였다. 하지만 느슨한 공시체와 유사하게 배수조건에 관계없이 공시체의 직경이 증가함에 따라 최대축차응력이 약간 증가하다가 다시 감소하였다. 한편 약간 조밀한 모래의 비배수 전단시험에서 박성식과 김영수(2011)는 공시체의 직경이 5cm에서 10cm로 증가함에 따라 최대축차응력이 30% 정도 증가한다는 결과를 얻었다. 이것은 공시체 건조밀도가 1.38g/cm^3 정도로 본 연구에서 사용한 1.30g/cm^3 보다는 약간 높고 1.50g/cm^3 보다 약간 낮기 때문으로 판단된다.

그림 6(a)와 6(b)은 각각 비배수와 배수시험에서 구속압 증가에 따른 느슨한 및 조밀한 공시체의 최대축차응력 변화를 비교하고 있다. 여기서 최대축차응력은 변형률 15% 이내에서 얻은 축차응력의 최대값을 나타낸다. 느슨한 공시체의 경우에는 비배수상태보다 배수상태의 경우 공시체의 경화현상으로 축차응력이 3배 이상 높게 나타났으나, 조밀한 공시체에서는 팽창하려는 모래 입자에 의해 음의 과잉간극수압이 높게 발생하여 반대로 비배수시험의 최대축차응력이 2배 이상 높게 나타났다. 또한 이와 같은 음의 과잉간극수압은 membrane penetration 작용을 일으켜 모래 입자를 더욱 조밀하게 하면서 높은 축차응력 발현에 일부 기여한 것으로 판단된다(Baldi와 Nova, 1984; Lade와 Hernandez, 1977). Chen(2006)은 섬유가 혼합된 모래에 대한 배수 및 비배수시험으로부터 이와 유사한 결과를 얻었다. 즉, 섬유가 포함되지 않은 경우에 대하여 공시체 상태가 느슨한 경우 배수시험 결과가 1.2배 정도 높은 축차응력을 보였으나, 조밀한 경

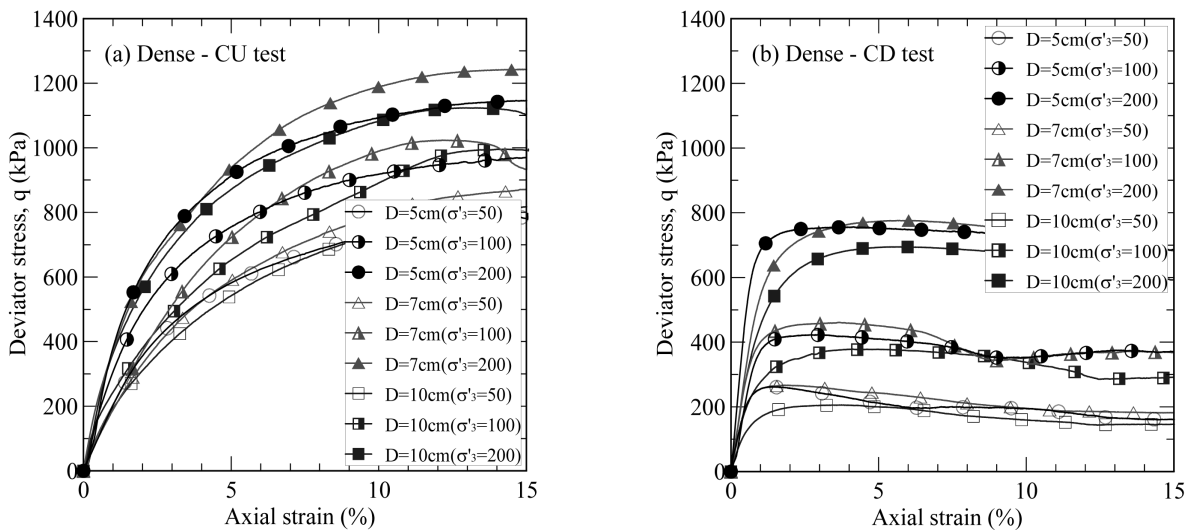


그림 5. 조밀한 공시체의 직경에 따른 비배수(a) 및 배수시험(b)의 축차응력-축변형률 관계

우에는 비배수시험에서 얻은 축차응력이 4배 정도 높게 나타났다. 그러나, Kodaka 등(2010)의 연구결과에 의하면 배수시험에서 얻은 축차응력이 비배수시험에서 얻은 축차응력보다 공시체의 상대밀도에 관계없이 항상 높게 나타나는 경향을 보였다. 이와 같은 배수조건에 따른 축차응력 차이는 연구자마다 사용한 모래, 상대밀도, 포화도가 다를 뿐 아니라 특히 시료성형방법이 서로 다르기 때문으로 판단된다.

3.2 공시체의 크기에 따른 과잉간극수압 또는 체적변형 비교

그림 7(a)와 7(b)는 비배수시험 결과로서 각각 느슨한 및 조밀한 공시체에서 구속압 및 직경 변화에 따른 과잉

간극수압을 비교하였다. 느슨한 공시체의 경우 축변형을 15%까지 지속적으로 양의 과잉간극수압이 발생하였으며, 구속압 증가에 따라 발생하는 과잉간극수압도 증가하였다. 조밀한 공시체의 경우 전단 초기에는 양의 과잉간극수압이 발생하지만 곧이어 체적이 팽창하려는 경향으로 음의 과잉간극수압이 발생하였으며, 구속압이 증가함에 따라 발생하는 음의 과잉간극수압은 감소하였다. 직경이 증가함에 따라 느슨한 공시체의 경우 발생하는 과잉간극수압이 약간 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보이지만 조밀한 공시체의 경우 직경의 증가에 따른 뚜렷한 경향을 구분하기 어려웠다.

그림 8(a)와 8(b)는 배수시험 결과로서 각각 느슨한 및 조밀한 공시체에서 구속압 및 직경 변화에 따른 체적 변형을 비교하였다. 느슨한 공시체의 경우 0.1-0.2% 정

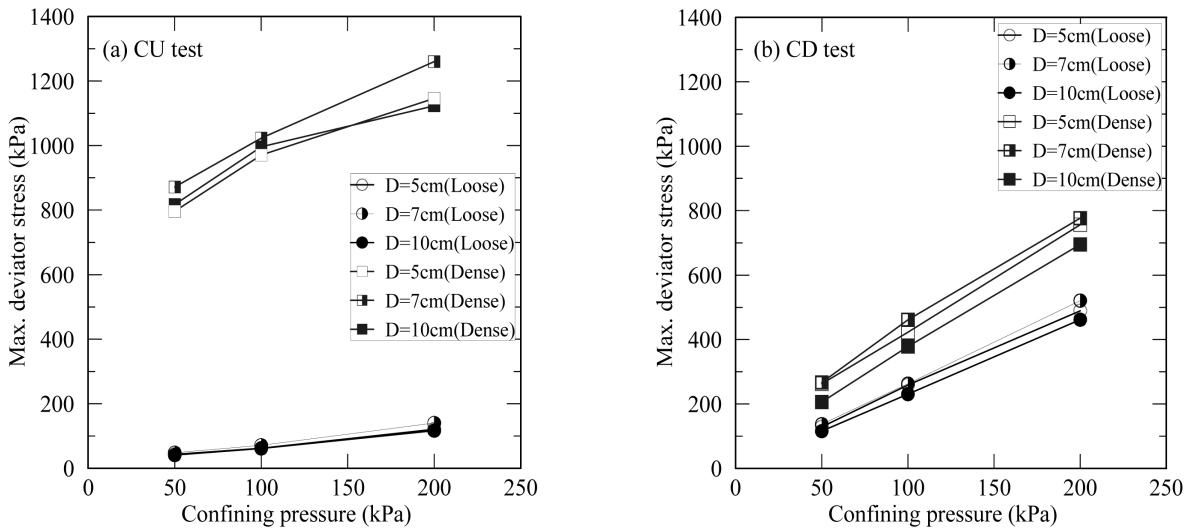


그림 6. 비배수 및 배수시험에서 구속압에 따른 최대축차응력의 변화

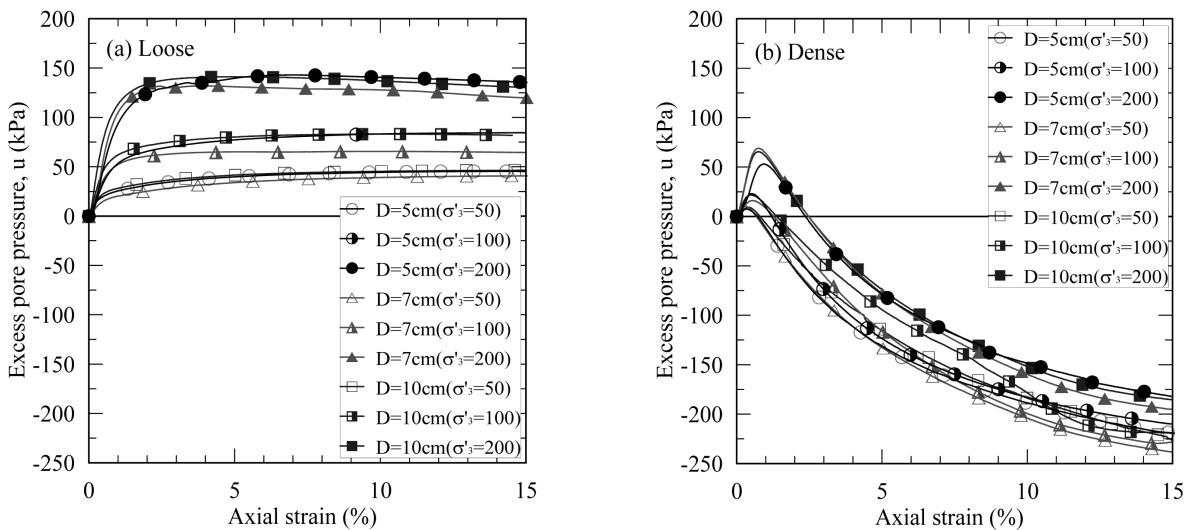


그림 7. 느슨한(a) 및 조밀한(b) 공시체의 직경에 따른 과잉간극수압-축변형을 변화

도의 미소한 체적변형이 발생하였으며 낮은 체적변형으로 측정의 정확도가 다소 떨어지는 경향을 보였다. 조밀한 공시체의 경우 전단 초기에는 체적이 감소하다가 축변형률이 1% 정도에 도달하면서 체적이 팽창하는 경향으로 전환하였으며, 구속압이 증가함에 따라 체적팽창 정도는 감소하였다. 공시체의 직경이 증가함에 따라 느슨한 공시체의 경우는 뚜렷한 경향을 보이지 않았으나, 조밀한 공시체의 경우에는 체적이 팽창하려는 경향이 약간 증가하다가 다시 감소하는 것으로 나타났다.

3.3 공시체의 크기에 따른 유효응력경로 비교

그림 9와 10은 각각 느슨한 및 조밀한 공시체의 직경

에 따른 비배수 및 배수시험의 결과에서 얻은 유효응력경로($p' = 1/3(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)$, $q = \sigma_1 - \sigma_3$)를 서로 비교하고 있다. 배수시험과 비배수시험에서 얻은 유효응력경로를 서로 비교하면 최대축차응력의 크기뿐만 아니라 양의 또는 음의 과잉간극수압이 발생하였는지 구분할 수 있다. 즉, 배수시험에서 얻은 유효응력경로의 오른쪽 부분에 놓이는 비배수시험의 유효응력경로는 음의 과잉간극수압 발생으로 인한 유효응력경로이다. 본 실험 결과에서는 한계상태의 뚜렷한 구분이 어려워 축차응력이 최대인 점을 연결한 선을 한계상태선(Critical State Line, CSL)으로 편의상 정의하였으며, 그 기울기를 M이라 하였다. 세 종류의 구속압에 대한 유효응력경로를 바탕으로 한계상태선의 기울기 M과 이로부터 구한 마찰각($\sin\phi' = 3M/(6+M)$)

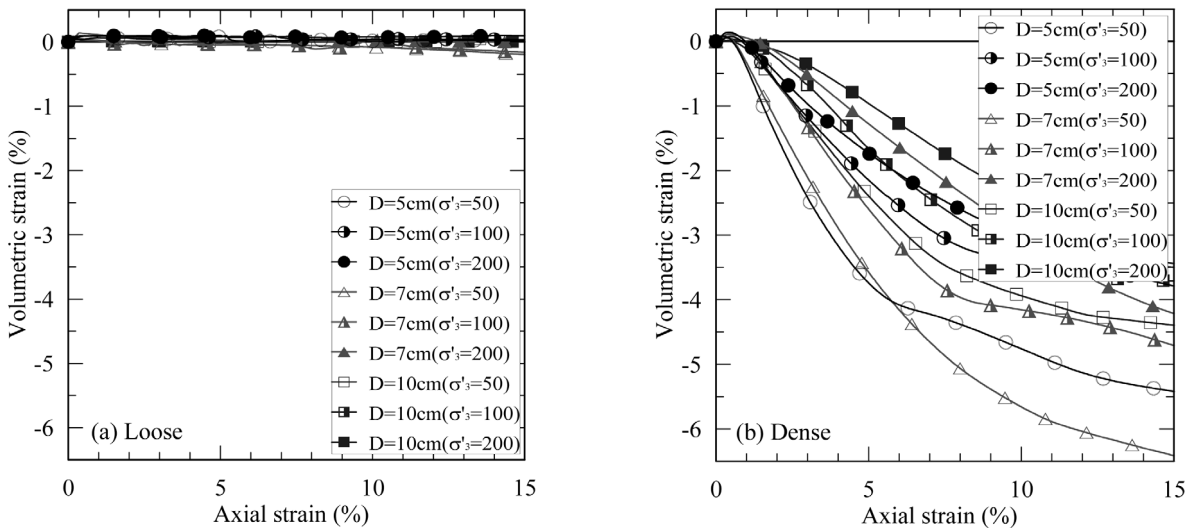


그림 8. 느슨한(a) 및 조밀한(b) 공시체의 직경에 따른 체적변형-축변형률 변화

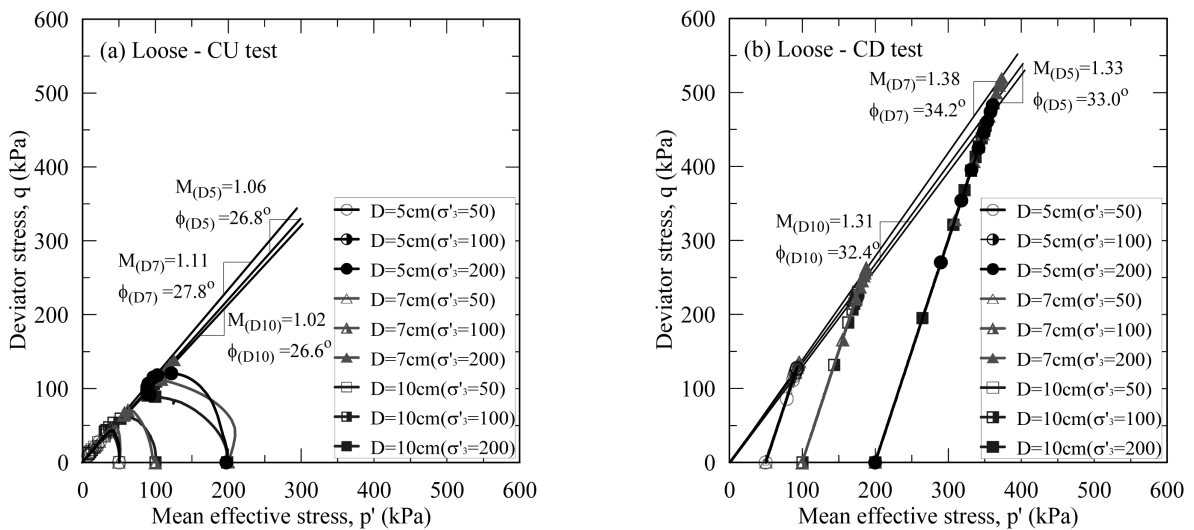


그림 9. 느슨한 공시체의 직경에 따른 비배수 및 배수시험 유효응력경로

을 각각의 그림에 표시하였으며, 공시체의 직경이 5cm에서 7cm로 증가함에 따라 마찰각이 약간 증가하다가 직경이 10cm로 증가함에 따라 다시 감소하는 경향을 보였다. 시험방법이 동일한 경우 직경의 크기에 따른 마찰각의 차이는 1도 정도로 미미하였다.

비배수시험 및 배수시험의 M값으로 부터 계산된 마찰각은 느슨한 공시체의 경우 비배수시험은 27-28도, 배수시험은 32-34도로 배수시험에서 얻은 마찰각이 5-6도 정도로 약간 높은 값을 나타내었다. 하지만 조밀한 공시체의 경우 비배수시험에서 얻은 마찰각은 37-38도, 배수시험에서 얻은 마찰각은 38-40도 정도로 배수조건에 따라 2도 정도만 차이가 났다.

3.4 공시체의 크기에 따른 전단강도 비교

상대밀도와 공시체 직경이 다른 각각의 공시체에 대하여 Mohr응력원을 그린 다음, 각각의 공시체 크기에 따른 Mohr응력원으로부터 마찰각을 계산하였으며, 표 4는 압밀 비배수 및 배수시험에서 얻은 마찰각을 서로 비교하고 있다. 비배수시험에서 얻은 비배수 전응력마

찰각(이하 ‘전응력마찰각’) 및 비배수 유효응력마찰각(이하 ‘유효응력마찰각’)을 각각 ϕ_{cu} 와 ϕ' 로 표시하였으며, 배수시험에서 얻은 배수마찰각을 ϕ_d 로 표시하였다.

전응력마찰각의 경우에는 느슨한 및 조밀한 공시체 모두 공시체의 직경이 5cm에서 7cm로 증가하면서 그 값이 약간 증가하지만 10cm로 될 경우 그 값이 다시 감소하는 경향을 보였다. 조밀한 공시체의 경우에는 공시체 직경이 증가함에 따른 마찰각 감소가 최대 4.5도 정도였다. 한편 유효응력마찰각의 경우에도 이와 유사한 경향을 보였으나 마찰각의 감소 정도는 1-2도 정도로 비교적 미미하였다.

배수마찰각의 경우 공시체의 직경 증가에 따른 마찰각의 변화는 상대밀도가 동일한 경우 2도 이내로 작았다. 느슨한 공시체와 조밀한 공시체의 배수마찰각 차이는 약 5도 정도로 비교적 작았다. 비록 5도 정도의 차이지만 조밀한 공시체가 다소 높은 점착력을 나타내므로 이를 고려할 경우 느슨한 공시체와 조밀한 공시체의 전단강도 차이는 크다고 볼 수 있다. 배수마찰각과 유효응력마찰각의 차이는 느슨한 공시체의 경우 약 7도 정도이지만, 조밀한 공시체의 경우에는 그 차이가 1도 정도로 미미하였다.

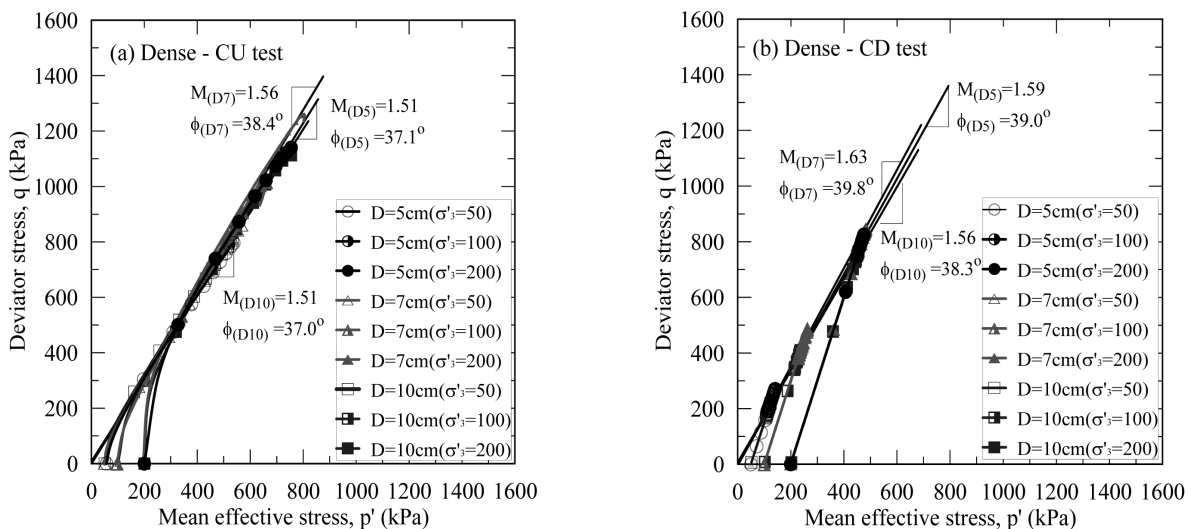


그림 10. 조밀한 공시체의 직경에 따른 비배수 및 배수시험 유효응력경로

표 4. 공시체의 크기에 따른 배수 및 비배수 전단강도

상대밀도	공시체 크기	ϕ_{cu} (°)	c_{cu} (kPa)	ϕ' (°)	ϕ_d (°)	c_d (kPa)
40%	소형	12.1	4.1	26.0	32.9	0
	중형	13.7	5.2	27.4	34.1	0
	대형	11.0	6.6	25.3	32.4	5
80%	소형	32.2	193.4	37.1	38.5	22
	중형	34.1	199.5	37.6	38.8	25
	대형	29.6	214.9	36.8	38.2	11

4. 결 론

본 연구에서는 입도분포가 균일한 사질토 지반의 강도정수 산정에서 공시체의 직경 크기가 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 직경이 5, 7, 10cm인 느슨하거나 조밀한 공시체에 대한 압밀 비배수 및 배수시험을 실시하여 각각의 경우에 대한 강도정수를 산정한 다음, 공시체의 직경 크기와 상대밀도 그리고 배수조건이 강도정수에 미치는 영향에 대하여 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 공시체의 상대밀도가 동일한 경우 공시체의 직경 크기가 비배수시험에서 구한 전응력마찰각 및 유효응력마찰각에 미치는 영향은 그다지 높지 않았다. 본 연구에서 사용한 공시체의 직경 차이가 최대 2배로 그다지 크지 않았기 때문에 판단되며, 현장에서 채취한 흙을 직접 사용한 Kodaka 등(2010)의 경우에는 직경의 차이가 6배(5cm에서 30cm로 증가)로 커지면서 세립분이 많이 포함되어 전응력마찰각이 31도에서 12도로 크게 감소하였다.
- (2) 배수마찰각의 경우는 공시체의 밀도에 관계없이 공시체의 직경이 마찰각에 미치는 영향은 높지 않았다. 이는 기존 연구결과(예: Kodaka 등, 2010)와 유사한 것으로 나타났다.
- (3) 비배수시험에서 구한 유효응력마찰각과 배수시험에서 구한 배수마찰각의 차이는 느슨한 공시체의 경우 약 7도 정도 차이가 났으나, 조밀한 공시체의 경우에는 시험방법에 따른 차이는 거의 나타나지 않았다.
- (4) 모래의 비배수 거동을 판단하는 비배수 마찰각을 결정할 경우에는 공시체의 직경이 가능한 큰 것으로 사용하여 직경에 따른 마찰각의 변화(감소)를 충분히 설계에 반영하는 것이 바람직하다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업지원을 받아 수행된 것임(No. 2010-0023540).

참 고 문 헌

1. 박성식, 김영수 (2011), 모래 지반 내에 포함된 자갈의 크기가 전단 거동에 미치는 영향, *대한토목학회논문집*, 제31권 1C호, pp.39-51.
2. Baldi, G. and Nova, R. (1984), "Membrane penetration effects in triaxial testing", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.110, pp.403-420.
3. Cerato, A. B. and Lutenegeger, A. J. (2006), "Specimen size and scale effects of direct shear box tests of sands", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.29, No.6, pp.1-10.
4. Chen, C.W. (2006), "Drained and undrained behavior of fiber-reinforced sand", *Transportation Scholars Conference*, Iowa State University, November 15, 2006.
5. Goto, S. and Tatsuoka, F. (1988), "Influence of several testing conditions in triaxial compression tests on sands and gravels", *Tsuchi-to-Kiso*, JGS, Vol.36, No.9, pp.13-18.
6. Ikemi, M., Tani, K., Okada, T., and Tanaka, Y. (1998), "Triaxial compression tests of soft rock specimen of 35-500 mm", *Proc. of 10th Domestic Symp. on Rock Mechanics*, pp.13-18.
7. Kodaka, T., Itabashi, K., Nakasima, K., Makita, Y., and Lee, K.-T. (2010), "Evaluation of deformation and strength characteristics of sandy gravel in river embankments (in Japanese)", *Geotechnical Engineering Journal*, Vol.5, No.2, pp.193-205.
8. Lade, P. V. and Hernandez, S. B. (1977), "Membrane Penetration Effects in Undrained Tests," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.103, No.GT2, pp.109-125.
9. Nabeshima, Y., Oda, K., and Matsui, T. (1999), "Performance of mini-triaxial test and its practical applications to soil investigation", *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol.9, No.2, pp.105-111.
10. Vaid, Y. P. and Sivathayalan, S. (2000), "Fundamental factors affecting liquefaction susceptibility of sands", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.37, pp.592-606.
11. Vaid, Y.P., Uthayakumar, M., Sivathayalan, S., Robertson, P.K., and Hofmann, B. (1995), "Laboratory testing of Syncrude sand", *Proceedings of the 48th Canadian Geotechnical Conference*, Vancouver, Vol.1, pp.223-232.

(접수일자 2011. 12. 14, 심사완료일 2012. 3. 14)