

새만금지역 해상에 퇴적된 사질토의 변형 및 전단강도 특성

Characteristics of Deformation and Shear Strength of a Sandy Soil Deposited on the SAEMANKEUM Sea

이 강 일^{1*} Lee, Kang-II

이 진 수³ Lee, Jin-Soo

주 재 우² Ju, Jae-Woo

최 종 표⁴ Choi, Jong-Pyo

ABSTRACT

This study aims at evaluating the engineering properties of very poor graded fine sands deposited on the sea. Using materials sampled at SAEMANKEUM area, a series of rowe cell consolidation tests and triaxial compression tests are conducted in order to evaluate the characteristics of deformation and shear strength by the relative density. Prior to those tests, a maximum and a minimum relative densities are obtained. As a result, it appears that the minimum void ratio is 0.88, and the maximum compactible relative density is about 71%. In addition, internal frictional angle appears to increase linearly with an increase of the relative density which is similar to that of the port KUNJANG.

요 지

본 연구는 육상과 접해있는 해상에 퇴적된 입자가 매우 균등한 실트섞인 세립질 모래지반의 공학적인 특성을 평가하기 위하여 새만금지역에서 시료를 채취하였다. 채취한 시료에 대하여 상대밀도 시험을 통해 최소 및 최대밀도시험을 하였으며 상대밀도 별 사질토의 변형특성과 전단특성을 평가하기 위하여 로우셀압밀시험 및 비배수 삼축압축시험을 실시하였다. 실험결과 상대밀도에 따라서 약간씩 차이는 있지만 새만금지역 해상사질토의 최대 압축 가능한 간극비는 0.88정도이며, 최대 다짐 가능한 상대밀도는 약 71%정도로 평가 되었다. 또한 내부마찰각은 상대밀도의 증가에 따라서 선형적으로 증가하는 양상을 보였으며 기 연구된 균장항에 퇴적된 사질토의 특성과 매우 유사한 전단거동을 보였다.

Keywords : Very poor graded silty sand, Triaxial compression test, Relative density, Internal frictional angle

1. 서 론

일반적으로 사질토는 지반특성이 양호하고 불교란 시료의 채취가 어려워 실험에 의한 설계정수를 획득하기 보다는 지반침하 및 강도특성을 경험적인 특성에 의존하여 설계하는 경우가 많다. 국내의 경우 국외(Holtz, 1991)에 비해 사질토에 대한 연구뿐만 아니라 육상과 접해있는 해상에 퇴적된 입도가 매우 균일한 세립질 모래에 대한 연구가 매우 미흡한 실정이다(주재우 등, 2006; 남정만 등,

2007). 그러나 최근 국내 해안일대의 방조제공사 뿐만 아니라 매립공사가 꾸준히 증가하고 있는 국내의 현실을 감안해볼 때 이러한 분야의 연구는 매우 중요한 의미가 있다.

흙 지반에서는 축차응력이 한계상태에 도달되어 그 구조골격이 흐트러져서 일어나는 흙 지반의 전단파괴를 주로 언급하며, 흙 지반의 강도라고 하면 항상 전단강도를 의미한다. 건조 조립토의 전단저항에 영향을 미치는 요인은 크게 두 부류로 나눌 수 있다(Lambe and Whitman, 1979). 첫 번째는 간극비, 구속응력(confining stress), 하중

1* 정회원, 대전대학교 건설시스템공학과 교수 (Member, Prof., Depart. of Civil Engrg., Daejin Univ., E-mail: kilee@daejin.ac.kr)

2 정회원, 순천대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Depart. of Civil Engrg., Sunchon National University)

3 정회원, 동신대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Depart. of Civil Engrg., Dongshin University)

4 비회원, 대전대학교 토목공학과 석사과정 (MS Student, Depart. of Civil Engrg., Daejin University)

2.2 실험장치

그림 2는 Rowe(1962)가 개발한 압밀시험기를 나타낸 것이며, 측정장치로는 크게 침하량을 측정할 수 있는 LVDT, 각 라인을 통해 유입된 수압을 측정하는 변환기, 압밀에 의한 배수나 투수량을 측정하는 체적변화계이므로 분류할 수 있다. 각종 측정장치를 통해 입력된 데이터는 디지털 신호로 컴퓨터로 저장할 수 있다. 또한 그림 3은 본 연구에서 사용한 삼축압축 셀의 구조 및 명칭을 나타내었다.

2.3 실험방법 및 조건

로우셀 압밀시험은 준비된 시료를 셀 안에 투입하기 전 셀의 몸체와 저부사이에 누수를 방지하기 위해 O링을 삽입하고 몸체와 저부를 타이볼트(tie-bolt)로 연결한 후 압밀시 마찰과 셀 벽체를 통한 간극수의 흐름을 방지하기 위해 몸체 벽면에 그리스 막을 형성하였다. 시료를 정치하기 전에 모든 연결라인에 대해 진공압을 이용해 공기를 완전

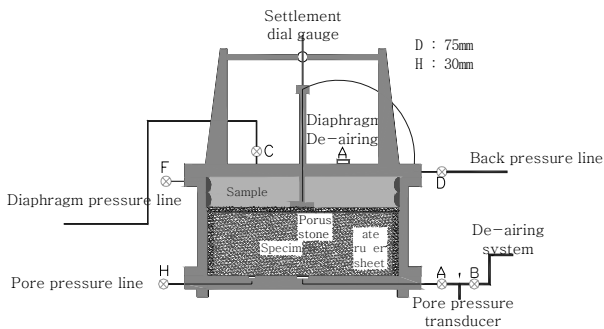


그림 2. 로우셀압밀시험장치

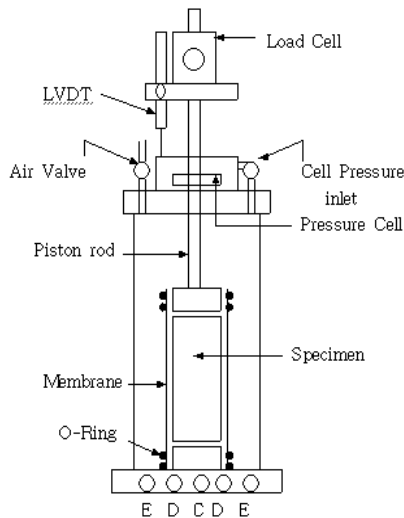


그림 3. 삼축압축셀구조 및 명칭

히 제거하였으며 모든 밸브들은 닫힌 채로 유지하였다. 위의 과정이 완료된 후 시료를 조심스럽게 스푼으로 소정의 위치까지 3단계에 걸쳐 증류수와 함께 투기한 후 상대밀도까지 다진다. 로우셀 내부에 사질토가 현장상대밀도에 도달한 후 셀 내부 및 diaphragm에 증류수를 채우고 셀 몸체와 상부를 타이볼트로 연결하였다.

본 연구에서 실시한 로우셀 압밀시험은 대상지역 최소 상대밀도를 재현해 본 결과 20%로 나타나 시험조건으로 상대밀도가 20, 40, 50, 60%인 4가지 경우에 대하여 초기 하중 5KPa에서부터 압밀을 시작하여 640KPa까지 조건으로 재하 하였다. 하중증가율($\Delta P/P$)은 표준압밀시험과 동일하게 1로 하였다. 하중재하시간은 침하가 발생하지 않을 때까지 실시하였고, 배수조건은 그림 4와 같이 상부방향으로 1면 배수만을 하였으며 변형조건은 등변형률로 하였다. 본 연구에 사용된 시료의 공시체의 크기는 직경 75 mm, 높이 30mm이다.

삼축압축 시험은 먼저 시료를 증류수와 함께 끓여 모래 입자내의 공기를 최대한 제거하고 삼축시험기 셀의 상하 판에 실리콘 그리스를 바르고 진공압을 가하여 공시체 몰드내에 두께 0.25mm의 멤브레인(membrane)을 O링과 함께 부착하여 공시체와 상판 및 하판 사이의 마찰에 의한 구속력을 제거하였다. 이는 재하판과 공시체 사이의 전단 응력이 발생하는 것을 방지하고 공시체내의 변형이 균일하게 분포되도록 하기 위해서이다.

삼축압축시험은 표 2와 같이 상대밀도가 40, 50, 60, 70%인 4개 조건에 대하여 등방압축압력 50, 100, 200KPa 조건으로 실시하였고, 사질토의 특성상 즉시 침하현상이 일어나므로 압축시간을 임의적으로 100분을 적용하였다. 전단시험은 각각의 등방압축응력을 갖는 상태에서부터 비배수상태로 실시하였으며, 구속압을 일정하게 유지시키고 σ_1 을 증가시키면서 축 변형률 15%까지 실험을 실시하였다. 공시체의 크기는 지름 50mm, 높이 100mm의 원주형으로 제작하였다.

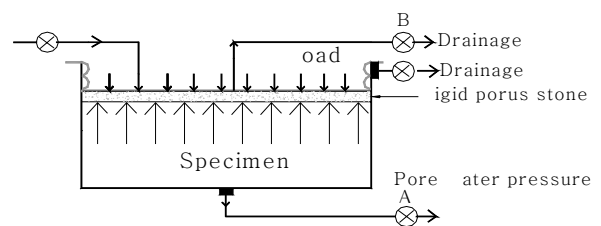


그림 4. 로우셀 시험의 배수 및 변형조건

표 2. 삼축압축 시험조건

상대밀도(%)	실험내용	등방압축 응력(KPa)	압축시간 (min)	전단속도 (%/min)	축변형률 (%)	공시체 크기 (mm)	초기간극비 (e)
40		50	100	0.5	15	D=50, H=100	1.0556
50		1.0015					
60		0.9459					
70		0.8907					

표 3. 상대밀도에 따른 공시체 제작방법(JSF. T 161, 1990)

상대밀도(%)	제 작 방 법
40	공시체몰드에 물을 1/2정도 주입한 후 모래를 수중 낙하시키면서 모래가공시체 몰드의 윗부분에 닿을 때까지 계속 반복한다.
50	공시체몰드에 물을 1/3정도 주입한 후 모래를 3스푼 공시체 몰드에 넣고 나무망치로 3방향에서 3번씩 타격하여 모래가 공시체 몰드의 윗부분에 닿을 때까지 반복한다.
60	공시체몰드에 물을 1/3정도 주입한 후 모래를 3스푼 공시체 몰드에 넣고 나무망치로 3방향에서 10번씩 타격하여 모래가 공시체 몰드의 윗부분에 닿을 때까지 반복한다.
70	공시체몰드에 물을 1/3정도 주입한 후 모래를 3스푼 공시체 몰드에 넣고 나무망치로 3방향에서 20번씩 타격하여 모래가 공시체 몰드의 윗부분에 닿을 때까지 반복한다.

2.4 공시체 제작방법

본 연구에서 공시체 제작은 상대밀도를 재현하는 방법으로 실시하였다. 먼저 배수 축진을 위해 시료의 하부에 여과지를 넣고 공시체 몰드 내에 증류수를 1/2정도 채운 다음 수중 낙하법을 행하였다. 모래를 3스푼 또는 5스푼 공시체 몰드에 넣고 나무망치로 공시체 몰드를 측면에서 타격하는 방법으로 상대밀도를 재현하였다. 그리고 여과지를 시료의 상부 중앙에 놓고 상판을 연결하여 멤브레인을 상판에 씌운 다음 O링으로 봉한다. 그 다음에 상부배수관을 상판에 연결시키고 40KPa의 2중 진공압을 가하여 사질토 시료의 형상유지 및 시료내의 공기를 제거할 수 있도록 하였다. 상대밀도에 따른 공시체 제작방법은 표 3과 같다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 로우셀 압밀시험 결과

3.1.1 하중-간극비 관계

그림 5는 상대밀도(Dr)가 각각 20%, 40%, 50%, 60%일 경우 하중(p)-간극비(e)의 관계를 비교하기 위해 나타낸 것이며 그림 상에 유효상재하중이 40KPa이상일 경우 회귀직선상관식을 함께 나타내었다. 그림에서와 같이 상대밀도가 20%인 경우는 하중-간극비곡선이 일반적인 점성토에서처럼 처녀곡선의 형태가 나타나고 있다. 그리고 상

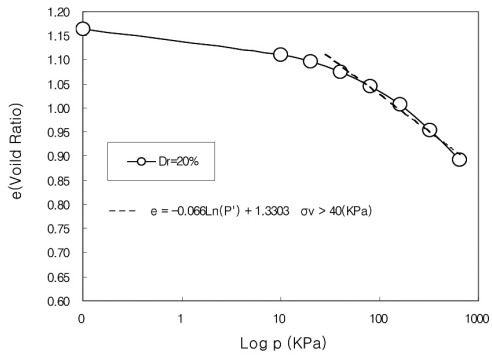
대밀도가 증가할수록 동일한 형태의 간극비-하중곡선의 형태를 보이고 있으나, 간극비의 감소는 현저히 둔화됨을 알 수 있다.

3.1.2 하중-상대밀도 관계

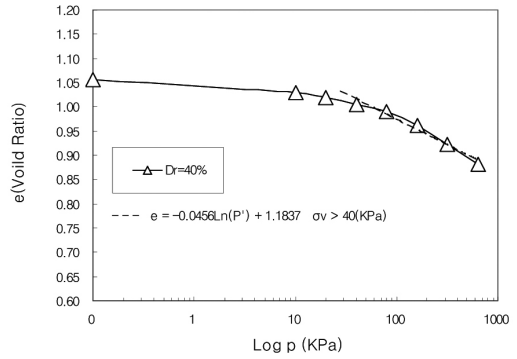
그림 6은 상대밀도가 각각 20%, 40%, 50%, 60%일 때 하중(p)-상대밀도(Dr) 관계를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 상대밀도가 20%인 경우 초기하중에서 상대밀도가 크게 증가하는 형태를 보이고 있다. 이는 앞서 간극비-하중관계 곡선에서와 같이 상대밀도가 대단히 낮게 형성되어 있으므로 초기하중이 증가함에 따라 급격히 체적이 감소하면서 상대밀도가 증가한 것으로 판단된다. 또한 상대밀도가 40%, 50%, 60%인 경우 하중이 증가함에 따라 상대밀도가 증가하는 경향을 보이고 있으나 그 증가폭은 크게 둔화됨을 알 수 있다. 특히 유효상재하중이 40KPa이내에서는 상대밀도의 증가가 크지 않았으나, 40KPa이상에서는 상대밀도가 선형적으로 증가하는 형태를 보였다. 더불어 유효상재하중이 40KPa이상일 경우 회귀직선상관식을 함께 나타내었다.

3.1.3 실험결과 분석

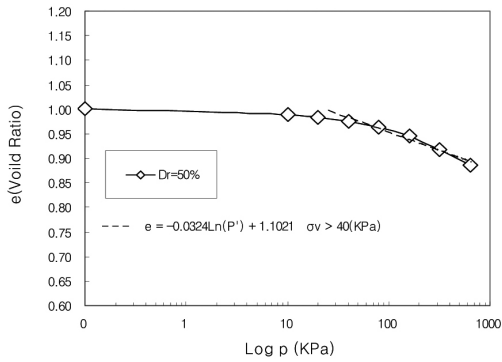
표 4는 e-logp곡선으로부터 산출한 새만금지역 세립질 모래의 압축지수를 나타낸 것이다. 상대밀도가 20%, 40%, 50%, 60%에서 유효상재하중 $\sigma'_v=40\text{KPa}$ 을 기준하여 계산한 것으로 그 값은 매우 작지만 상대밀도가 20%일 경우에 비해 60%인 경우의 압축지수가 2배정도 감소함을 보



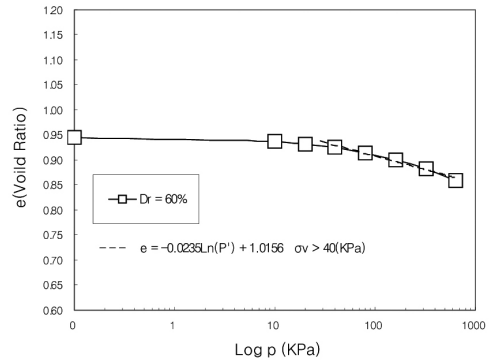
(a) Dr=20%인 경우



(b) Dr=40%인 경우

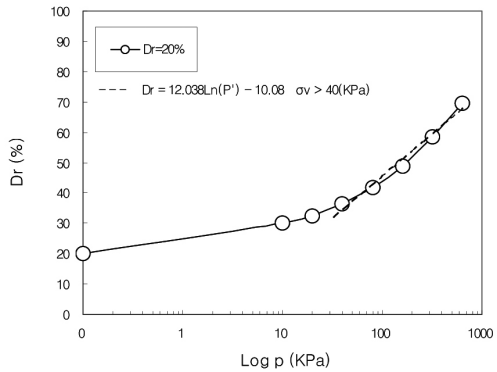


(c) Dr=50%인 경우

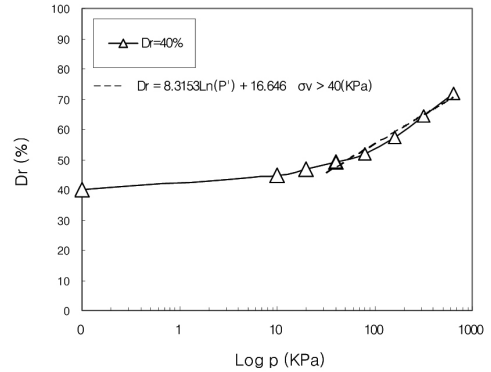


(d) Dr=60%인 경우

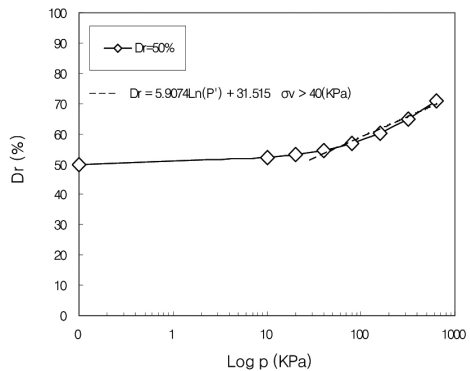
그림 5. 로우셀 압밀시험을 통한 하중-간극비 관계



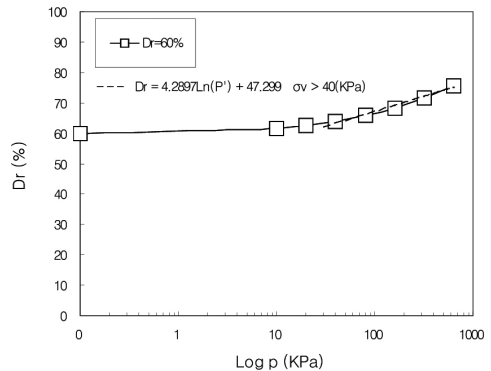
(a) Dr=20%인 경우



(b) Dr=40%인 경우



(c) Dr=50%인 경우



(d) Dr=60%인 경우

그림 6. 로우셀 압밀시험을 통한 하중-상대밀도 관계

표 4. 새만금지역 세립질 모래의 압축지수(Cc)

상대밀도(%)	20	40	50	60
Cc	0.0174	0.0132	0.0113	0.009

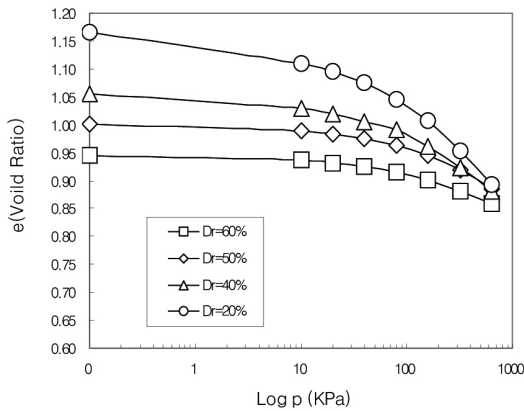


그림 7. 하중-간극비 관계곡선

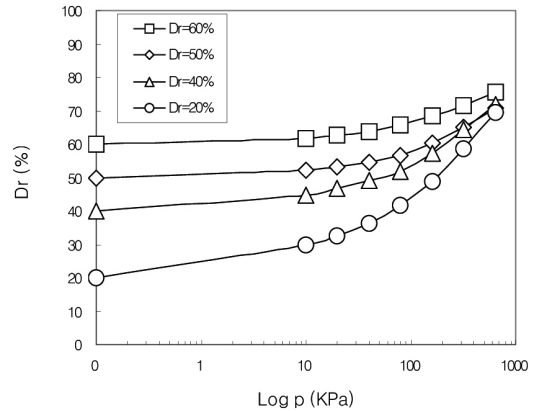


그림 8. 하중-상대밀도 관계곡선

였다.

그림 7과 그림 8은 로우셀 시험을 통해서 얻은 하중-간극비, 하중-상대밀도 관계를 함께 분석하여 나타낸 것으로 상대밀도가 20%, 40%, 50%, 60%인 조건에 따라서 약간씩 그 값의 차이는 보이지만, 유효상재하중이 640KPa일 경우 새만금지역 해상사질토의 최대압축 가능한 간극비는 0.88정도이며 더불어 최대다짐 가능한 상대밀도는 약 71%정도로 나타났다.

3.2 삼축압축시험결과

삼축압축시험은 수중 낙하법을 이용함과 동시에 공시체 몰드 주변을 타격하는 회수를 조절함으로써, 반입된 시료에 대하여 상대밀도가 40, 50, 60, 70%에 대하여 공시체를 제작하였다. 제작된 시료에 대하여 압밀비배수 전단시험을 실시하였다.

3.2.1 응력-변형률 관계

그림 9는 삼축압축시험에 의해 얻어진 응력-변형률의 관계를 상대밀도별, 등방압축응력별로 구분하여 나타내었다. 상대밀도가 40%, 50%, 60%인 경우는 낮은 구속압을 제외하고는 응력 경화현상이 나타나지만 상대밀도가 70%인 경우는 8~12%정도의 축 변형률에서 최대 피크점을 보이면서 변형률 연화현상이 나타나고 있다.

홍원표 등(1994)은 원통형 공시체를 대상으로 한 Lade와 Nelson(1987)의 등방압축시험과 삼축압축시험 결과를

이용하여 응력-변형률 거동을 해석하여 예측치를 비교하였는데 그 결과 모래의 축차응력은 축 변형률이 증가함에 따라 서서히 증가하다가 축 변형률이 약 5%일 때 축차응력이 최대가 되어 파괴가 일어나고, 그 후 축차응력이 점점 감소한다고 하였다. 그러나 본 연구의 실험 결과는 이러한 유사한 특징을 보이지 않았다. 이는 적용시료의 입자가 더 세립질 모래이었기 때문으로 판단된다.

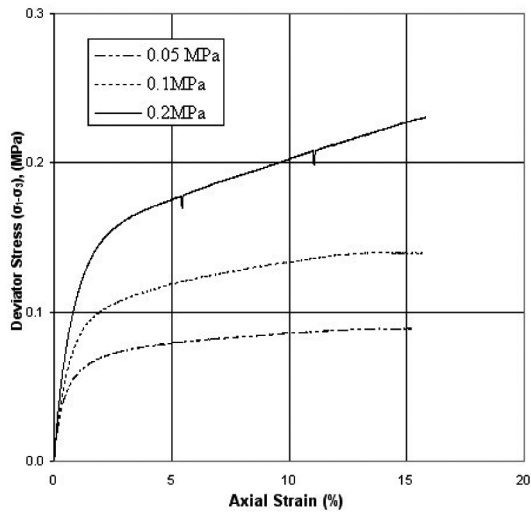
3.2.2 구속압에 따른 최대축차응력

그림 10은 상대밀도별로 등방압축 응력에 따른 최대축차응력의 크기를 나타낸 것이다. 응력-변형률 관계에서처럼 상대밀도와 등방압축응력이 클수록 최대축차응력이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 상대밀도가 40%, 50%인 경우에 비해 상대밀도가 60%, 70%인 경우가 등방압축 응력에 따른 최대축차응력의 크기는 상대밀도가 높을수록 크게 나타났으며, 최대축차응력의 증가량은 상대밀도가 커질수록 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다.

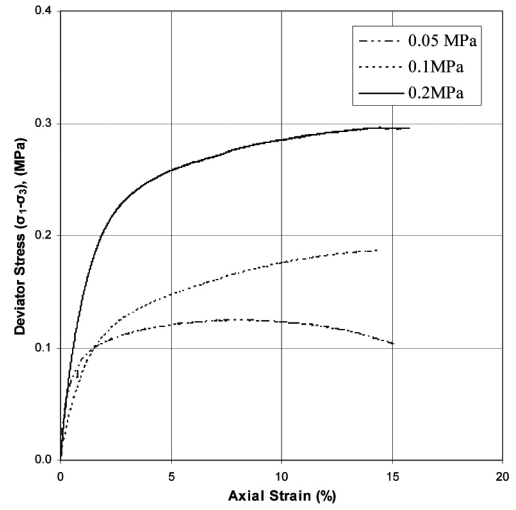
그림 11은 대표적으로 상대밀도가 40%인 경우에 대하여 Mohr-Coulomb 파괴포락선을 나타낸 것으로 내부마찰각은 24.47° 점착력은 0.012MPa 정도를 보였으며 상대밀도가 증가할수록 내부마찰각 및 점착력은 선형적으로 증가하는 양상을 보였다.

3.2.3 상대밀도(Dr)와 내부마찰각(Φ)의 관계

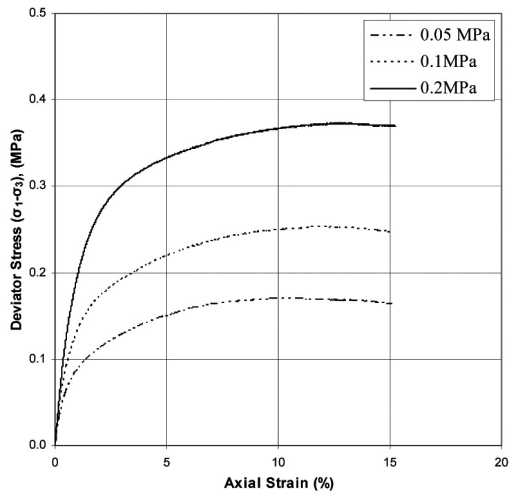
그림 12는 Mohr-Coulomb의 파괴규준을 이용하여 상대밀도에 따른 내부 마찰각과의 관계를 나타낸 것으로 삼축



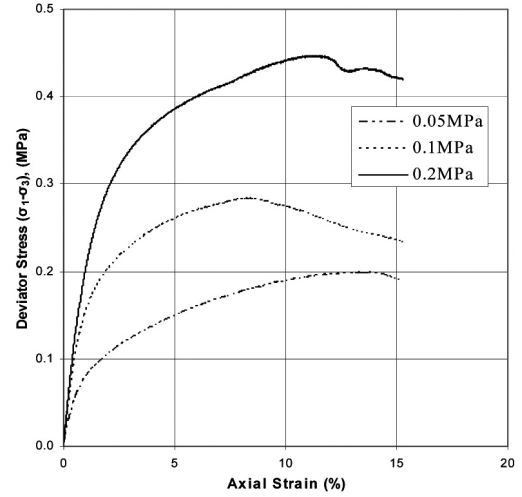
(a) $D_r=40\%$ 인 경우



(b) $D_r=50\%$ 인 경우



(c) $D_r=60\%$ 인 경우



(d) $D_r=70\%$ 인 경우

그림 9. 상대밀도에 따른 삼축압축시험 결과

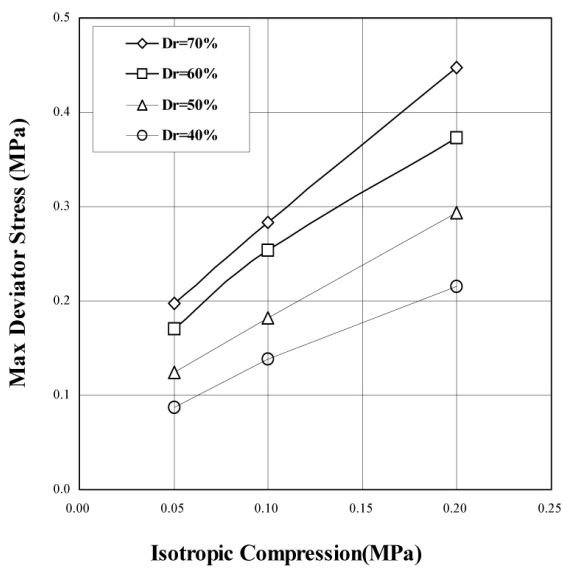


그림 10. 최대축차응력-등방압축응력 관계

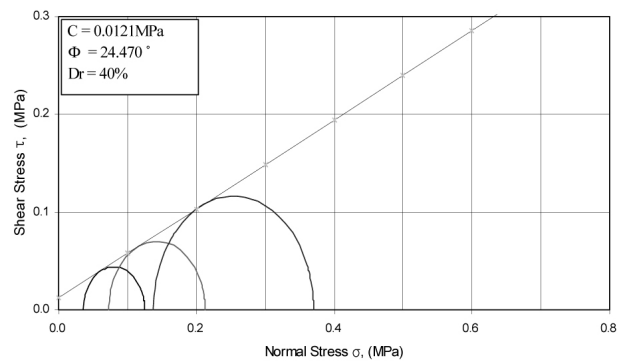


그림 11. Mohr-Coulomb 파괴포락선($D_r=40\%$)

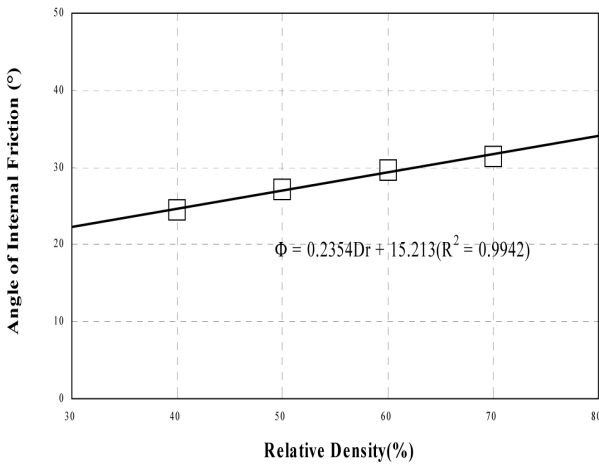


그림 12. 상대밀도(Dr)-내부마찰각(Φ) 비교

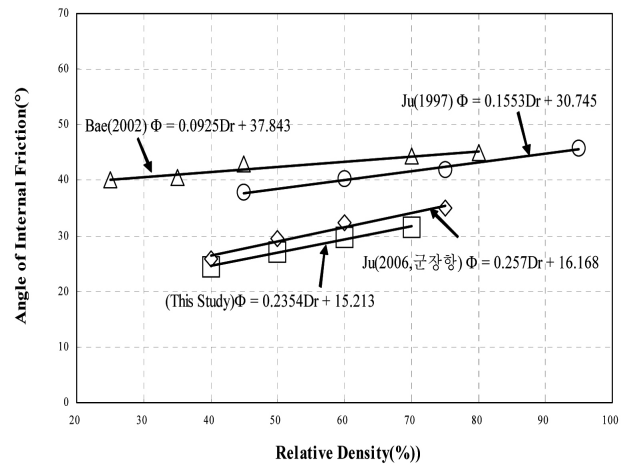


그림 13. 상대밀도-내부마찰각의 기존 연구와의 비교고찰

압축시험결과, 식 (1)과 같이 상관관계식이 있음을 알 수 있었다.

$$\Phi = 0.2354Dr + 15.213 \quad (1)$$

여기서, Φ 는 내부 마찰각($^{\circ}$), Dr 은 상대밀도(%)를 나타낸다. 식 (1)을 이용하여 실험에 사용되지 않은 상대밀도의 내부마찰각을 추정해 볼 수 있으며, 그 범위는 상대밀도가 40~70%이다.

그림 13은 주문진 표준사에 대한 삼축압축시험의 기존 연구결과(배성환 등, 2002; 주재우 등, 1997)를 본 연구결과와 상호 비교검토하기 위해 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 본 연구에서 사용한 세립질 모래의 경우 기존 주문진 표준사보다 내부마찰각이 15.5~18.5 $^{\circ}$ 정도 작은 경향을 보이고 있다. 이는 본 연구에서 사용한 시료가 주문진표준사보다 입자의 크기가 더 작고, 입도범위 또한 실트성분이 많아 최소밀도가 더 작기 때문으로 평가된다. 또한 새만금지역과 인접한 균장향에 대하여 실험한 결과(주재우 등, 2006)와 함께 비교해 본 결과, 본 연구의 내부마찰각이 약간 더 작게 평가되었지만 매우 유사한 실험결과가 얻어졌다. 이는 균장향과 새만금지역이 서로 인접해 있고 퇴적된 시료의 입자 특성이 실트섞인 모래질이며 #200체 통과량이 균장향의 경우 12.5%로 새만금시료와 매우 유사하였다. 또한 최대 및 최소밀도등도 유사한 특성을 보였기 때문에 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 새만금지역 사질토지반에 대한 변형 및 강도특성을 파악하고자 로우셀시험 및 삼축압축시험 등을 실시하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 로우셀 압밀시험결과 상대밀도가 40%이상인 경우에는 하중-간극비곡선이 일반적인 점성토에서처럼 처너 곡선의 형태가 나타나고 있으며, 상대밀도가 증가함에 따라 간극비의 감소는 둔화됨을 알 수 있다. 또한 최종적으로 유효상재하중이 640KPa일 경우 새만금지역 해상사질토의 최대압축 가능한 간극비는 0.88정도이며, 최대다짐 가능한 상대밀도는 약 71%정도로 나타났다.
- (2) 삼축압축시험 결과 축 변형률에 대한 축차응력은 상대밀도가 크고, 등방압축응력이 클수록 크게 나타났다. 또한, 축 변형률에 8~12%정도에서 축차 응력의 피크점이 나타났고 상대밀도가 클수록 피크점이 뚜렷하게 나타났다.
- (3) 상대밀도에 따른 삼축압축시험결과 내부마찰각을 토대로 $\Phi = 0.2354Dr + 15.213$ 이라는 실험식을 유도하였으며 이는 균장향에서 얻은 실험결과와 유사하였다.

감사의 글

이 논문은 2010학년도 대진대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

참고문헌

1. 남정만, 조성환, 김태형 (2007), “제주 해안지역 모래의 압축특성”, *한국지반공학학회논문집*, 제23권, 제6호, pp.103-114.
2. 배성환, 박춘식, 정정욱 (2002), “삼축압축시험에 의한 주문진 표준사의 변형-강도특성에 관한 연구”, *대한토목학회 학술발표회논문집*, pp.390-393.
3. 주재우, 최혁남, 박종범, 박재근 (1997), “삼축시료 제작 및 주문진 표준사의 전단특성”, *대한토목학회 논문발표집*, pp.189-192.
4. 주재우, 박종범, 정규향, 박현수 (2006), “삼축압축시험과 Rowe Cell시험에 의한 사질토지반의 변형 및 강도특성 연구”, *대한토목학회 정기학술대회논문집*, pp.3993-3996.
5. 홍원표, 남정만 (1994), “등방단일경화구성모델에 의한 모래의 3차원거동예측”, *한국지반공학회지*, 제10권, 제1호, pp.103-116.
6. Holtz, R. D. (1991), *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold, New York, pp.166-223.
7. JSF. T 161 (1990), “최대밀도, 최소밀도 시험법”, *일본 토질공학회 논문집*.
8. Lade P. V. and Nelson, R. B., (1987), “Modeling the Elastic Behavior of Granular Materials”. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.11, pp.521-542.
9. Lambe, T. W and Whitman, R. V. (1979), *Soil Mechanics*. Jone Wiley and Sons, New York.
10. Rowe, P. W., (1962), “The Stress-Dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol.269, pp.500-527.

(논문접수일 2010. 8. 11, 심사완료일 2010. 9. 17)