Non-textbook soil의 공학적 특성에 대한 고찰

글 | **김태준** | 토목기술부 과장
전화 02-3433-7769 E-mail : ktjssm@ssyenc.com

지반의 공학적 특성 파악을 위한 연구는 주로 순수 점토나 모래에 편중되어 왔으나, 실제 자연 상태의 지반은 순수 점토나 모래가 아닌 점토나 모래에 실트나 자갈 등이 혼재된 Non-textbook soil의 형태를 가지고 있다.

그러므로 순수 점토나 모래의 연구 내용을 그대로 Non-textbook soil에 적용하는 데에는 한계가 있는 것이다. 선진 외국의 경우도, 소수 연구자들에 의해 간헐적으로 Non-textbook soil의 전단 강도 및 액상화, 투수성과 관련된 연구가 진행되었으나, 제한적인 실험결과로 인해 명확한 결과 도출이 어려워 이에 대한 심도 깊은 연구가 필요한 실정이다.

1 서론

지반공학에서 다루고 있는 토질역학에 관한 연구는 모래와 점토지반의 외부하중 작용에 따른 거동에 관한 것이 대부분을 차지한다. 연구 대상 지반이 모래나 점토로 국한되는 이유는 일반적으로 점토지반에서의 시료 채취시 시료교란 영향이 적으며, 실내 실험시 균질한 시료 조성이 가능하다는 점 때문이다.

국내의 경우, 최근 국토의 효율적인 활용을 위해 준설 매립을 통한 인공지반 조성 및 해안의 연약 지반 개발에 많은 투자를 하고 있다. 이러한 투자를 통한 연구의 성과로, 연약 지반과 관련된 지반조사 및 설계, 시공 분야에서 많은 발전이 이루어졌다. 그러나 자연 상태 지반이 순수 점토나 모래로만 구성된 것이 아닌, 실트 및 자갈 등이 혼재 된 경우가 대부분이므로 정확한 지반 정수 산정을 위해서는 실트질 점토나 실트질 모래, 점토질 모래, 모래질 점토 등과 같은 Non-textbook soil에 대한 연구가 수행되어야 한다.

이러한 과정을 통해 지반 거동 분석을 위한 지반조사 방법 및 해석 방법이 한 단계 더 발전될 것이며, 설계 최적화를 통한 구조물의 안정성 증대 및 경제적 시공 또한 가능하리라 기대된다.

본고에서는 Non-textbook soil에 대한 기존 연구 결과들을 정리한 Purdue University의 연구보고서를 참조하여, 그 공학적 특성에 대한 개략적인 소개를 하고자 한다.

2 연구 동향

지반의 공학적 특성 파악을 위한 기존 연구는 이론적 연구를 통한 수치 해석적 방법과 현장 원 위치 실험 및 실내 실험을 통한 경험적 방법에 의해 수행되고 있다. 이러한 연구의 대부분은 순수 모래나 점토의 다양한 상황에서의 공학적 특성 파악을 위해 수행되고 있다. 하지만, 흙의 전단거동과 같은 공학적 특성은 투수성에 의해 큰 영향을 받으므로, 순수 점토나 모래의 연구결과를 Non-textbook soil의 형태를 갖는 자연 상태 지반에 그대로 적용하기에는 한계가 있다. 즉, 배수나 비배수 상태 실험으로부터 산정된 토질 정수들을 구조물 설계에 사용할 경우, Non-textbook soil인 자연 상태의 대부분의 지반은 완전한 배수나 비배수 상태가 아니므로, 이에 대한 고려가 적절히 되지 않는다면 매우 보수적이거나 불안전 요소를 내포한 설계가 될 수 있는 것이다.

이러한 문제에 대한 인식을 통해 외국의 경우, 실트질 모래나 점토질 모래, 실트질 점토, 모래질 점토와 Cementation된 흙에 대한 공학적 특성 파악을 위해 현장 원위치 실험을 위주로 하여 전단강도 및 액상화, 투수성 등과 관련된 연구를 수행하였다. 그러나 이러한 연구 또한, 현재까지는 매우 한정적인 실험결과로 인해 명확한 결과 도출이 어려워, 이에 대한 심도 깊은 연구가 필요한 상황이다.

3 Non-Textbook soil

3-1. 실트질 모래 및 점토질 모래

세립질 흙을 함유한 모래에 대한 연구는 지난 20년 동안 대부분 지

진과 관련된 문제에 편중되어 수행되었다. 이는 지진하중에 의한 액상화 및 그와 관련 문제가 모래에 함유되어 있는 세립질 흙의 양과 밀접한 관련이 있기 때문이다.

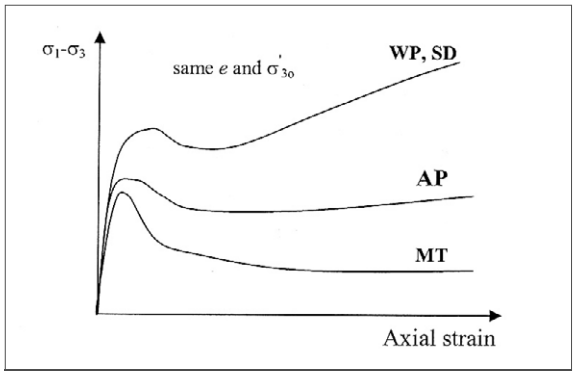
통일분류법상 실트질 모래나 점토질 모래는 4.75mm보다 큰 입자가 총 중량 중 최소 50% 이상 함유되어있고, 75㎛ 보다 작은 입자가 12%보다 많은 경우로 정의되어있다.

용어적 측면에서 순수 모래와 실트질 모래 및 점토질 모래는 3가지의 기본적 차이를 가지고 있다. 첫째는 액상화의 논리적 평가를 위한 주의 깊은 밀도 정량화 방법이 요구되며, 둘째는 밀도 및 응력 상태에 대한 분석만으로는 그 거동을 정확히 예측할 수 없다는 것이며, 마지막으로 세립토 함량뿐 아니라 소성에 대한 적절한 설명이 필요하다는 것이다.

◉ 강도 및 응력-변형률 반응

밀도의 정량화를 위한 적절한 매개변수 결정은 세립토를 함유한 모래의 역학적 거동연구에서는 핵심사항이며, 이는 소수 연구자들에 의해 수행되었다. 그러나 아직도 거동 분석을 위한 최적의 매개변수가 무엇인지는 결정되지 않고 있다.

실내 실험을 위한 시료조성 방법은 크게 MT(Moist Tamping)방법, AP(Air Pluviation)방법, WP(Water Pluviation)방법 또는 SD(Slurry Deposition)방법으로 분류되며, 이렇게 조성된 조립질 흙의 응력-변형률 거동은 그 조성 방법에 의해 크게 영향은 받는다. 아래 [그림 1]은 세 가지 방법에 의해 조성된 느슨한 모래시료의 비배수 삼축 응력-변형률 거동을 나타낸 것이다.



[그림 1] 모래의 비배수 응력-변형률 반응

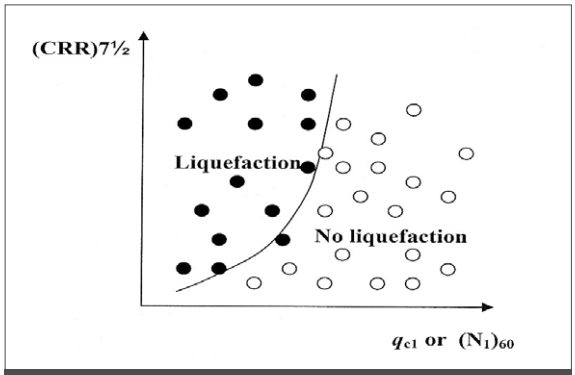
Vaid(1994)에 의하면, MT 방법은 시료(충적토)를 균질하게 조성하지 못하며, WP 방법은 재료분리 현상 때문에 세립질 흙을 함유한 모래 시료 조성에는 부적절하다고 한다. AP 방법에 의해 느슨한 실트질 모래 시료는 매우 압축적인 거동을 보이며, SD 방법에 의해 조성된 시료는 WP 방법 에 의한 시료 및 충적토와 비슷한 거동을 보이고 있다.

Salgado et al.(2000)는 모래의 주어진 상대밀도와 구속응력 하에서, 비소성의 세립토 함량이 증가할수록 저변형률에서의 강도가 감소함을 확인하였다. 점토질 모래의 경우, 점토 비율이 7.5%정도 함유될 때 액상화가 발생하며(Georginnou et al.1990), Wood and Kumar(2000)는 삼축 압축 시험을 통해, 점토 비율이 40%이상 되면 배수 및 비배수 거동에 대한 응력-변형률 반응이 변하지 않음을 확인하였다.

◉ 반복 하중에 대한 반응

기존의 지진 자료에 의하면, 액상화와 관련된 위험은 충적토나 물다짐, Tailing Dam과 같은 수생 모드의 퇴적아래 형성된 세립질 흙을 포함한 포화된 느슨한 퇴적토와 깊은 연관이 있음을 알 수 있다. 중국과 일본의 지진 결과로부터, Chang(1987)은 세립토를 함유한 흙은 소성 및 비소성 특성과는 무관하게 모두 액상화에 의한 영향을 받는다고 하였다. 이와 같은 현상은 일본 Kobe지진(1995)이나 터키의 Adapazari지진(1999)에서도 확인되었다.

초창기(1960~1970년대) 순수 모래에 대한 액상화 연구 결과로부터, 아래 [그림 2]와 같은 반 경험적인 액상화 추정곡선이 만들어졌다.



[그림 2] 액상화 평가를 위한 반경험적 방법

CPT 실험 결과, 관입 저항치가 같을 경우 세립토 함유로 인해 액상화에 대한 저항치가 증가하였다(Robertson and Wride 1998; Youd et al. 2001). 그리고, 기존의 지진 결과로부터 액상화와 관련

된 대부분의 문제들이 실트나 점토와 같은 세립토를 포함하고 있는 모래층의 존재 여부와 깊은 관련이 있음이 확인되었다.

◉ 압축성 거동

점토질 모래의 압축 거동에 대한 연구가 Martin et al.(1990)에 의해 수행되었으며, 1차 하중 재하에 따른 압축성은 일반적인 모래 거동과 비슷하며, 압축곡선의 위치가 초기 간극비의 함수임이 확인되었다. 그리고 이러한 점토와 모래의 혼합토 거동은 불연속 입도의 점토질 모래 거동과 유사함이 실험을 통해 검증되었다.

3-2. 실트질 점토

통일분류법에 따르면, 실트질 점토는 A라인이나 그 위에 위치하거나, LL 〈 50, 4 〈 PI 〈 7, 200번체 통과량이 50%이상의 세립토를 함유한 경우에 해당된다.

◉ 강도 및 응력-변형률 반응

실트질 점토에 대한 압밀 응력과 비배수 전단강도에 대한 심도 깊은 연구가 Mesri & Ali(1999)에 의해 수행되었다. 압축 범위에서 각 압밀-전단 모드에 대한 수직 압밀 응력비에 대한 비배수 전단강도비, 수직 압밀 응력비에 대한 전단거동에 의해 유발된 과잉간극수압비, 파괴시 마찰각과 정지상태의 토압계수는 모두 일정하며, 압밀 응력에 무관하다고 한다.

◉ 반복하중에 대한 반응

과입밀비에 따른 실트질 점토의 반복하중에 대한 삼축 실험이 Brown et al.(1975)에 의해 수행되었으며, 약간 과압밀된 시료에서는 일정한 양압력이 발생하며, 매우 과압밀된 시료에서는 부의 간극수압이 발생한다고 한다.

Guo & Prakash (1999)은 낮은 소성의 실트나 실트질 점토의 지진에 의한 액상화 가능성 평가에 대한 가이드라인 부재에 대해 지적하였다. 즉, 실트질 점토와 같은 흙에 대한 이해가 부족하며, 때로는 모래와 실트의 혼합토와 혼동되고 있다고 하였다.

◉ 압축성, 붕괴 거동

Rao & Reddy(1998)은 재성형 실트질 점토시료의 팽창/붕괴 특성에 대한 물리-화학적 영향요소에 대해 연구하였다. 포화된 실트질 점토 시료의 압축 거동은 모든 압력 하에서 물리-화학적인 효과에 의해 영향을 받았다. 비교적 물리-화학적인 효과는 저압에서 오직 습윤한 상태의 건조한 실트질 점토의 부피 변화에 영향을 주었고, 반면에 역학적 효과는 고압에서 발생하였다.

◉ 투수성

Leroueil et al.(1992)는 실트질 점토의 투수성에 관한 연구를 수행하였다. 그 결과로부터 피에조미터와 BAT시스템으로 추정된 결과가 과소평가되는 반면, 셀프 보링 투수시험기의 결과가 대체적으로 적절히 추정되고 있음이 확인되었다.

온도에 따른 투수성 변화에 대한 연구가 Konard & Samson(2000)에 의해 수행되었다. 실험결과로부터 log K와 e사이의 관계곡선 기울기인 투수지수는 온도 증가와 반비례하며, 응고 전 흙에서는 투수지수가 1.4이나 -12℃ 온도에서는 최대 8까지 증가한다고 한다.

Rinaldi & Cuestas(2002)는 느슨한 실트질 점토 시료에 대한 수리전도성 실험을 수행하였으며, 전기 및 수리 전도성 사이의 관계를 결정하였다. 전기 전도성은 공극 속의 염분 함유량 및 함수비에 의해 주로 영향을 받으며, 밀도는 별다른 영향을 주지 않는다고 한다.

◉ 부가 연구

연약한 실트질 점토에 대한 현장 및 실내 실험이 Nash et al(1992)에 의해 수행되었으며, 그 결과 다른 연약 점토에 비해 높은 유효강도 매개변수와 비배수 강도를 가지고 있음이 확인되었다. 그리고 Choa(1994)는 매립토로 사용할 준설점토에 대한 연구를 수행하여, 실트질 점토의 투수성 향상을 위해서는 수직 배수재와 함께 진공 프리로딩 방법이 효과적이라고 하였다.

3-3. 모래질 점토

통일분류법상 200번체 통과량이 50% 이상이며, 통과 중량이 30% 이상인 세립토를 모래질 점토로 분류된다. 액성 한계 50을 전후로 CL과 CH로 구분되며, 모래질 점토에 대한 연구는 거의 소수 연구자들에 의해서만 수행되었다.

◉ 강도 및 응력-변형률 반응

Wallace(1973)은 베인전단시험기와 직접전단시험기를 이용하여 모래질 점토의 전단강도 범위를 38~125kPa, 마찰각의 범위를 29~38° 로 추정하였다. Toll & Ong(2003)은 불포화 상태의 모래질 점토에 대한 삼축실험을 수행하여 불포화 한계상태를 나타내는 다

섯 개의 매개변수에 대한 특성을 분석하였다. 또한, 모래질 점토에 Suction 조절이 가능한 장비들을 이용한 실내 실험과 수치해석방법을 이용하여, 불포화토 거동에 대한 연구가 일부 학자들에 의해 수행되었다(Alonso et al. 1990; Thomas & He 1998).

◉ 압축성

Wallace(1973)은 모래질 점토의 압밀시험을 통해 특정 압력(1.7~3.6t/ft^2) 초과 시, 매우 높은 압축성을 나타내며 자연 상태의 압축지수는 0.79~2.3의 범위를 나타낸다고 하였다.

3-4. 모래질 실트

통일분류법상 200번체 통과량이 50% 이상이며, 그 중량이 30% 이상, LL〈50, PI〈4 이하인 세립토가 모래질 실트로 분류된다. 모래질 점토와 마찬가지로 이에 대한 연구는 거의 수행되지 않았다.

◉ 강도 및 응력-변형률 반응

Thevanayagam et al.(2002)은 모래질 실트와 다른 종류 흙들의 거동과 비배수 부스러짐 정도를 평가하기 위해 비배수 삼축 실험을 수행하였다. 실험 결과, 모래질 실트의 역학적 거동 및 파괴 가능성은 접촉한 내부 알갱이들의 밀도와 관련 있다고 한다. 즉, 모래질 실트의 전단 거동에 영향을 미치는 것은 접촉하고 있는 내부 알갱이들의 밀도와 마찰력이라고 한다. 그러므로 모래질 실트는 같은 간극비를 가지는 순수 실트에 비해 더 높은 강도를 갖는다고 한다.

◉ 반복 하중에 대한 반응

간극수압 발생 및 액상화 후 소산 거동 및 치밀화 거동을 연구하기 위해 비배수 진동 시험이 수행되었다. 그 결과, 모래질 실트의 간극수압 발생율이 순수 모래의 경우보다 다소 높음이 확인되었다.

◉ 부가 연구

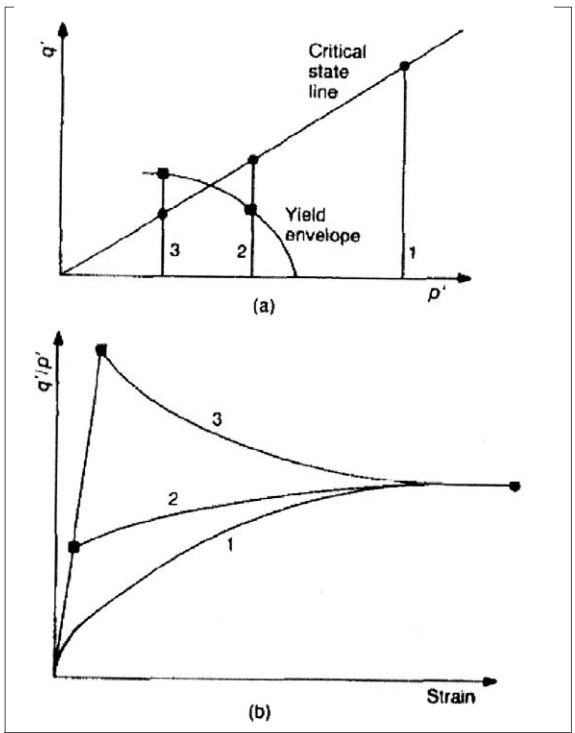
Rollins et al.(1998)은 모래질 실트에서의 동다짐 효율에 대한 함수비 영향에 관해 연구하였다. 적용함수비는 6~20%이며, 다짐 실험은 24.3m에서 중량 5t 을 낙하하여 수행하였다. 효율 측정은 관입심도 측정과 다짐 전후에 대한 콘 관입 시험 및 비교란 시료 채취를 실시하여 그 정도를 평가하였다. 관입 심도는 함수비가 증가할수록 증가되며, 개량 정도가 함수비 17%까지는 증가하나 그 이후로는 감소하였다. 최대 건조 단위중량은 깊이에 따라 감소하나, 최적 함수비는 압축 에너지가 임팩트 포인트 아래에서 깊이에 따라 감소하기 전에 증가하였다.

3-5. Cemented soil

흙의 Structure 및 Cementation은 토질역학의 기본 개념인 초기 간극비나 응력이력과 같이 흙의 역학적 거동을 결정하는데 매우 중요한 인자이다(Leroueil and Vaughan 1990). Cementation은 흙 입자의 접촉면이나 공극 속, 입자 표면에 결합 물질인 실리카, 철, 알루미늄의 수산화물, 유기물이나 각종 탄산염 등의 침전으로 인해 부분적인 생긴 흙 입자들의 결합을 말하는 것으로, 이러한 결합은 교란에 의해 파괴될 수 있다(Mitchell 1993).

◉ 강도 및 응력-변형 반응

자연적으로 Cementation이 유발된 흙의 독특한 강도 특성은 전통적인 흙의 파괴 거동과는 무관한 양상을 보인다(Sangrey 1972). 그림 3은 Cemented soil의 이상적인 응력 및 변형률 거동을 나타낸 것으로 파괴거동양상이 흙의 초기 상태에 의해 영향 받고 있다(Coop & Atkinson 1993;Leroueil & Vaughan 1990).



[그림 3] Cemented soil 의 이상적인 거동 ; (a)응력 경로 (b)응력-변형률 거동

Cementation 결합의 감소는 일반적인 흙의 변형률 경화 현상과 상반되는 거동을 보이는 Structured soil에서 Friction material로의 점진적인 변환을 유발한다. 또한, Structure는 광물 및 입자 모양이나 입도와 같은 특성과 마찬가지로 모래의 기본적인 속성으로 여겨져야 한다(Cuccovillo & Coop 1997).

Walsh et al(1995)은 자연적으로 Cementation이 유발된 흙에 대한 원위치 실물 재하시험을 수행하였으며, 그 결과로 이러한 흙에서는 말뚝의 샤프트 주위의 최대 주면 마찰력을 발현시키기 위해서는 더 큰 처짐이 요구되어진다고 한다.

◉ 반복 하중에 대한 반응

석회질흙의 Cementation 여부에 따른 비배수 진동 삼축실험이 Airey & Fahey(1991)에 의해 수행되었다. 실험결과에 따르면, Cementation 정도가 높을수록 더 놓은 진동 응력에서 저항하며, 재하 정도에 따라 간극압이 발생하지 않은 탄성적인 거동을 보이거나, 간극압이 발생하여 최종적으로 파괴되는 양상을 보인다고 한다.

◉ 압축성, 붕괴 거동

Structured sand의 압축성은 핵심 매개변수로 여겨지며, 특히 석유기술자들에게는 대부분의 오일이나 가스가 모래나 사암층에서 발견되기 때문에 더욱 중요하게 여겨진다. 석유산업분야에서 수행된 수많은 삼축시험 결과를 참조해보면, 입자들 사이의 Cementation에 의한 결합력은 입자들 자체의 결합력보다는 더 작은 것으로 확인되었다. 즉, 압축하중에 의한 항복점은 Cementation 결합보다는 입자들 간의 파괴와 더 관련 있는 것이다.

Salt-cemented soil의 압축과 붕괴에 대한 습윤 및 용탈 효과에 관한 연구가 수행되었다(Abduljauwad & Al-Amoudi 1995). 그 결과, Cementation된 흙 속으로의 증류수 침투로 인해 자연적으로 형성된 Cementation 결합은 파괴되며, 그로 인해 침하량이 증가하며 붕괴가 유발된다고 한다. 그러나, 습윤에 의한 붕괴유발효과는 미비하다고 한다.

3-6. Artificially-Cemented Soil

Cementation에 대한 연구는 자연적으로 조성된 흙에서 뿐만 아니라, Cementation 첨가제를 사용하여 인공적으로 조성한 흙에서도 수행되었다. 이렇게 조성된 흙들은 자연상태의 Cemented Soil과 Fabric은 유사하나, Structure 측면에서는 많은 차이점을 가지고 있다(Mitchell 1993). 즉, 인공적으로 조성된 흙이 자연적으로 조성된 흙보다 더욱 안정적이다.

가장 일반적인 Cementation 유발 첨가제는 Portland cement와 Lime(석회), Calcite(석회석), Gypsum(석고) 등이 있다. Ismail et al.(2002b)은 여러 첨가제를 이용한 삼축 압축 실험을 수행하여 흙의 파괴 후 거동에 대한 분석을 실시하였다. 그 결과, Portland cement가 첨가된 경우, 흙은 연성파괴거동을 보이며 파괴 후 강한 팽창성 거동을 보이는 반면, Calcite와 Gypsum이 첨가된 흙에서는 취성 파괴 후 압축적인 거동이 관찰되었다.

아래는 각종 유발 첨가제에 의해 조성된 인공 시료의 강도 및 변형 특성에 대한 기존의 실험 결과들을 정리한 것이다.

◉ Portland cement

Portland Cement에 의해 Cementation이 유발된 흙의 일축 압축강도는 양생 온도 및 양생 시간, 시멘트 함량 등에 비례한다고 한다. 그러나 점토 및 황 화합물, 유기물 혼합물이 증가할수록 일축 압축강도는 감소한다고 한다(Puppala et al. 1995; Schnaid et al.2001).

Consoli et al.(2000)은 양생조건(구속압력 적용여부)을 달리해가며 응력-변형률 거동에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 Cementation 과정 중의 응력상태는 역학적 거동에 큰 영향을 미치며, 구속압력은 강성의 감소와 마찰각의 증가를 유발한다고 한다.

◉ Lime

수화된 생석회가 첨가된 인공시료에 대한 삼축 압축시험이 Asghri et al.(2003)에 의해 수행되었으며, 전단 거동시 1000kPa보다 낮은 구속압에서 팽창한다고 한다. 그리고 전단강도는 Cement 함유량이 증가할수록 증가하나, 구속압력이 커질수록 그 영향은 점점 더 감소한다고 한다. 즉, 파괴 포락선이 선형적이라기보다는 비선형적인 곡선의 형태를 가지게 되는 것이다.

◉ Calcite

석회석을 이용한 Cementation 유발기술이 Ismail et al.(2002a)에 의해 개발되었으며, 실험 결과를 통해 그 강도는 각 알갱이들의 고유 강도와 밀도, 주요 흙 알갱이들의 크기 감소, Calcite에 의한 알갱이들의 코팅여부, 흙 알갱이들의 둥근 정도에 따라 좌우된다고 한다.

◉ **Gypsum**

Coop & Atkinson(1993)은 인공적으로 Cementation이 유발된 탄산염에 대한 구속압을 9MPa까지 증가시키면서 삼축 거동에 대한 연구를 수행하였다. 실험 결과 Cementation은 세립토 증가에 의해 유발되는 비중의 감소에 중요한 영향을 미친다고 한다. 이러한 결과는 응력-변형률 거동 및 Cementation의 결합 파괴에 요구되는 최대 강도에 영향을 미친다.

Huang & Airey (1998)는 건조단위중량과 석고의 함량을 조절해가며 Cementation 정도와 밀도에 관한 연구를 수행하였다. 그 결과 결합효과는 선행압밀하중보다 응력이 작은 경우에서만 나타난다고 한다. 그리고 강도와 강성은 밀도와 Cement 함유량이 증가할수록 증가하며, 밀도가 증가함에 따라 Cementation에 의한 영향은 감소한다고 한다.

4 결 론

Non-textbook soil의 공학적 특성에 대한 연구가 현재까지는 매우 제한적으로 수행되었으나, 무한한 잠재력을 가진 연구 분야인 것만은 사실이다. 본고에서는 기존의 연구결과를 통해 Non-textbook soil에 대한 특성을 알아보았으며, 그 결과는 아래와 같다.

① 점토질 모래의 경우, 비소성 세립토의 함량이 증가할수록 저변형률에서의 강도가 감소한다. 그리고, 점토 비율이 7.5%정도 함유될 때 액상화가 발생하며, 세립토를 함유한 흙은 흙의 소성/비소성 여부와 상관없이 모두 액상화에 영향을 받는다.

② 실트질 점토의 경우, 약간 과압밀된 상태에서는 반복하중에 의해 양압력이 발생하며, 매우 과압밀된 상태에서는 부의 간극수압이 발생한다. 그리고, 다른 연약 점토에 비해 더 높은 비배수 강도를 갖는다.

③ 모래질 점토의 경우, 특정 압력 초과시 매우 높은 압축성을 나타낸다.

④ 모래질 실트의 경우, 입자의 밀도와 마찰력에 의해 전단거동이 영향을 받으며, 순수 실트에 비해 높은 강도를 갖는다. 그리고 순수 모래에 비해 비배수 진동 실험 시, 더 큰 간극수압이 발생한다.

⑤ Cementation은 흙의 역학적 거동을 결정짓는 매우 중요한 인자이며, 그 결합은 교란에 의해 파괴될 수 있다. Cementation이 유발된 흙의 강도 특성은 전통적인 흙의 거동과는 달리 초기 상태에 의해 크게 영향을 받는다. 그리고 압축 하중에 의한 항복점은 Cementation에 의한 결합보다는 입자들 간의 파괴와 더 연관이 있다.

참고문헌

1. Abduljauwad, S. N., and Al-Amoudi, O. S. B. (1995). "Geotechnical behaviour of saline sabkha soils." Geotechnique, 45(3), 425-445.
2. Aiery, D. W., and Fahey, M.(1991). "cyclic response of calcareous soil from the North-West of Australia." Geotechnique, 41(1), 101-121.
3. Alonso, E. E., Gens, A., and Josa, A. (1990). "A constitutive model for partially saturated soils." Geotechnique, 40(3), 405-430.
4. Brown, S. F., Lashine, A. K. F., and Hyde, A. F. L. (1975). "Repeated load triaxial testing of a silty clay." Geotechnique, 25(1), 95-114.
5. Chang, N. Y. (1987). "Liquefaction susceptibility of fine-grained soils-Preliminary study report." Miscellaneous Paper GL-87-24
6. Choa, V. (1994). "Application of the observation method to hydraulic fill reclamation projects." Geotechnique, 44(4), 735-745.
7. Coop, M. R., and Atkinson, J .H. (1993). "The mechanics of cemented carbonate sands." Geotechnique, 43(1), 53-67.
8. Cuccovillo, T., and Coop, M. R. (1997). "Yielding and pre-failure deformation of structured sands." Geotechnique, 47(3), 491-508.
9. Georgiannou, V. N., Burland, J. B., and Hight, D. W. (1990). "The undrained behaviour of clayey sands in triaxial compression and extension." Geotechnique, 40(3), 431-449.
10. Gou, T., and Prakash, S. (1999). "Liquefaction of Silts and Silty ?clay mixtures." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 125(8), 706-710.
11. Konard, J. M., and Samson, M. (2000). "Influence of freezing temperature on hydraulic conductivity of silty clay." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(2), 180-187.
12. Leroueil, S., Lerat, P., Higth, D. W., and Powell, J. J. M. (1992). "Hydraulic conductivity of a recent estuarine silty clay at Bothkennar." Geotechnique, 42(2), 275-288.
13. Leroueil, S., and Vaughan, P. R. (1990). "The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks." Geotechnique, 40(3), 467-488.
14. Mersi, G., and Ali, S. (1999). "Undrained shear strength of a glacial clay overconsolidated by desiccation." Geotechnique, 49(2), 181-198
15. Nash, D. F. T., Powell, J. J. M., and Lloyd, I. M. (1992). "Initial investigation of the soft clay test site at Bothkennar." Geotechnique, 42(2), 163-181.
16. Rao, S. M., and Reddy, P. M. R. (1998). "Physico-Chmical behaviour of Dry silty clays." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124(5), 451-453.
17. Rinaldi, V. A., and Cuestas, G. A. (2002). "Ohmic Conductivity of a Compacted silty clay." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128(10), 824-835.
18. Robertson, P. K., and Wride, C. E. (1998). "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test." Canadian Geotechnical Journal, 35(3), 442-459.
19. Rollins, K. M., Jorgensen, S. J., and Ross, T. E. (1998). "Optimum moisture content for dynamic compaction of collapsible soils." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998(124), 8.
20. Salgado, R., Bandini, P., and Karim, A. (2000). "Shear strength and stiffness of silty sand." Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 126(5), 451-462.
21. Sangrey, D. A. (1972). "Naturally cemented sensitive soils." Geotechnique, 22(1), 139-152.
22. Thevanayagam, S., Shenthan, T., Mohan, S., and Liang, J. (2002). "Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy silts." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128(10), 849-859.
23. Thomas, H. R., and He, Y.(1998). "Modelling the behaviour of unsaturated soil using an elastoplastic constitutive model." Geotechnique, 48(5), 589-603.