

<2004년 2월 서울대학교 박사학위 논문>

간척지의 과압밀 현상과 역학적 특성 연구

원 정 운

서울대학교 농업기반건설공학 연구실



1. 서 론

한반도 서남해안에 폭넓게 분포하고 있는 조간대는 오랜 기간 동안 농업활동을 위해 간척되어 왔으며, 역사적 기록을 보면 A.D. 1248년 최초로 간척이 수행된 것으로 나타나 있다. 최근에는 농업적 목적 이외에도 항만, 철도, 도로, 산업단지 및 택지 조성 등과 같은 다양한 목적으로 조간대 또는 간척지의 개발이 진행되고 있는데, 조간대는 대부분 연약한 실트 또는 점토로 구성되어 있기 때문에 지반 침하, 안정성과 같은 각종 문제들을 야기하게 된다.

전세계 자연점토에 대해 많은 연구자들이 지적한 것과 유사하게 서해안 주변의 일부 해상점토층은 현재 상재하중보다 큰 하중을 과거에 겪지 않았음에도 불구하고 과압밀비가 1보다 크게 나타난다. 이러한 과압밀 현상의 원인에 대해서 많은 연구자들이 토적속도, 지연압밀, cementation 작용, 점토의 구조, 지하수위 변동 등을 제시하고 있다. 한국의 조간대는 동남아의 연약층이나 여타 다른 나라의 연약층과 퇴적환경의 측면에서 다소 다른 조건을 가지고 있다. 그러나 지반공학적 문제를 해결함에 있어 대부분 외국의 특수한 환경에서 형성된 지반에 대한 역학적 특성을 적용하고 경험식을 이용하고 있으며 서해안 조간대의 과압밀 원인에 대한 연구와 퇴적환경이 역학적 특성에 미치는 영향에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 이러한 상황에서 한반도 서해안의 독특한 퇴적환경에 의해 형성된 조간대의 과압밀 현상의 원인을 고찰하고 국내 조간대의 퇴적환경에 따른 역학적 특성에 대해 연구하는 것은 의미 있는 일이라 할 수 있다.

2. 과압밀과 퇴적환경

연약층의 선행압밀하중은 입자간 결합력의 붕괴와 입자간 변위가 발생하기 시작하여 전반적인 구조적 변화가 발생하기 시작하는 하중으로 정의되며, 최근에는 이 하중이 과거 최대하중과 연관되어 있지 않기 때문에 점차 항복하중으로 불리고 있다. 자연상태의 점토는 이차압축과 cementation과 관련된 화학작용에 의한 연대효과로 인해 종종 겔보기 과압밀상태에 있게 된다. 만약, 어떤 흙이 선행하중의 제거에 의하지 않고 과압밀 상태에 놓이게 되었을 때, 이를 겔보기 선행압밀이라 부르며 이러한 점토를 NC aged 점토라 부른다. 과압밀의 원인은 크게 지질학적 침식이나 방하작용, 굴착등과 같은 전응력의 감소, 지하수위 변동, 대수층, 건조수축과 같은 유효응력의 변화, ageing 이나 cementation과 같은 점토구조의 변화, 온도변화, pH변화, 강우, 이온치환 등과 같은 환경의 변화로 구분할 수 있다. 실제로 과압밀 현상은 적어도 하나 이상의 작용에 의해 발생할 것이며 실제 심도에 따른 응력이력은 매우 복잡하게 나타날 것이다. Aged clay의 전단거동은 young clay의 거동과 다르게 나타난다고 알려져 있다. 겔보기 과압밀과 지질학적 의미의 과압밀 사이의 차이는 Ko값에서 잘 나타난다. NC aged clay의 Ko값은 OCR 값에 독립적으로 대략 NC young clay의 값과 유사한 범위를 가지고 있다.

한반도 서해안은 수많은 만과 염하구, 그리고 도서들로 해안을 이루고 있는데, 이들은 Holocene 해수면 상승 동안에 형성된 지형들이다. 이러한 해안 지형 때문에 특히 세립 퇴적물이 주로 퇴적되게 되었으며 이로 인해 광범위한 조간대가 발달되어 있다.

한반도 서해안은 매우 높은 조위차와 함께 저구릉성 지형이라는 특징을 가지고 있으며 전세계 다른 나라에 분포하고 있는 넓은 조간대의 경우와 달리 fronting beach나 swash bar, spits, 또는 보호섬이 없으며 또한 복잡한 조간대 배수 시스템이 없는 것이 특징이다. 대조차 환경과 개방적 형태의 지형 특성에도 불구하고 한반도 조간대는 동수역학적 에너지 수준이 낮으며, 입도와 퇴적구조의 변화폭이 매우 좁다. 제4기 후기 동안 한반도의 해수면 변동은 보면, 7,000 yr BP의 평균 해수면은 현재 평균 해수면의 6.5m아래에 위치하였고, 4,000 yr BP에는 4m 아래, 그리고 2,000 yr BP에는 약 2.5m 아래에 위치하였다. 현재 해수면은 지난 5,000 yr BP까지 비교적 빠르게 상승하다가 5,000~2,000 yr BP 사이에는 그 속도가 감소하였으며, 그 후 2,000 yr BP 이후에 다시 상승속도가 증가하였다. 7,000 yr BP 이후 해수면은 진동 없이 지속적으로 상승하였다. 한반도 서해안의 연안 퇴적층들의 발달과 소멸은 이러한 해수면 변동과 밀접하게 관련되어 나타난다. 즉 높은 해수면 동안은 매우 두꺼운 퇴적층이 형성되며, 상대적으로 낮은 해수면 시기 동안은 오래된 퇴적층의 침식과 풍화작용으로 인한 부정합면이 형성될 것이다. 전세계 현재 조간대 퇴적물과 달리 한반도 조간대의 퇴적층은 후퇴성 상향 조립화의 입도조적을 보인다. Holocene 해침 동안에, 조간대의 지속적인 후퇴에 의해 발생하는 상향 조립화의 입도구조는 느린 해수면 상승속도와 느린 퇴적속도에 의해 발생된다.

3. 재료 및 실험

한반도 서해안 조간대의 퇴적환경과 역학적 특성을 조사하기 위하여 대표적으로 2개 지역을 선정하여 연구를 진행하였다. 남약지역은 영산강 하구에 위치하고 있어 염하구 환경을 대표하며, 시화지역은 개방형 해안인 만 환경을 대표하고 있다.

각 연구지역에 대해 2개소씩 시추조사를 실시하였다. 과압밀 현상을 확인하기 위하여 연구지역에서 채취한 자연시료를 이용하여 압밀시험을 수행하였다. 또한 현장에서 시추조사 지점에서 피에조콘시험을 수행하여 심도에 따른 응력이력을 파악하였다. 연구지역 연약층의 퇴적시기를 파악하고 퇴적속도를 구하기 위하여 퇴적물에 대한 연대측정을 수행하였다. 또한 연구대상지역에 대한 퇴적환경과 지질학적 사건에 대한 문헌고찰을 통해 지질학적 의미의 과압밀이 있었는지를 파악하고자 하였다. 퇴적구조를 분석하기 위하여 입도분석과 X-radiography 촬영을 수행하였다. 주사전자현미경촬영과 수은기공도분석을 통해 미세구조를 분석하였다. 지화학, 총유기탄소, 총질소, 염분농도, pH, 간극수 이온분석을 수행하여 연구지역의 퇴적환경과 퇴적 후 환경에

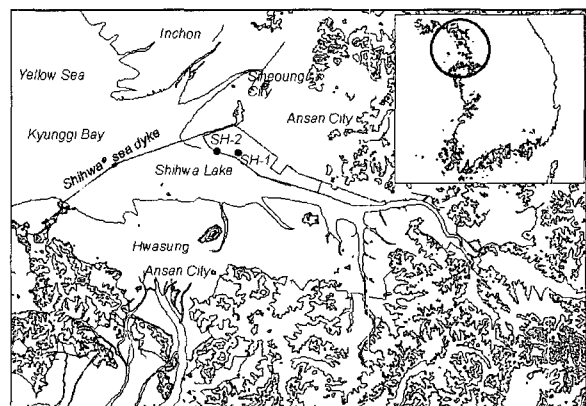
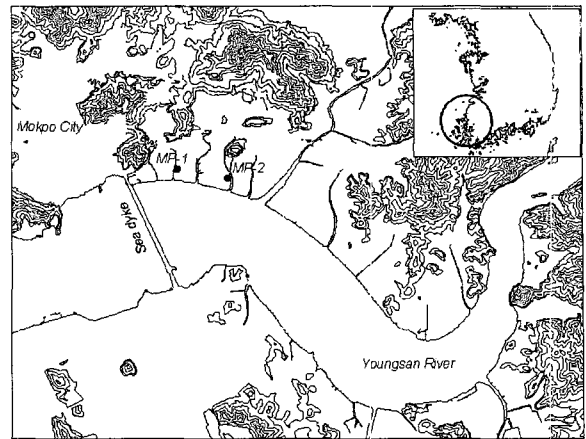


그림 1 연구지역

대한 정보를 수집하였다. 간극수 이온분석결과와 함께 TOC와 TN을 이용하여 구한 탄산염을 이용하여 cementation 영향을 평가하였으며, 대자율을 측정하여 대기노출이나 풍화작용이 있었는지를 조사하였다. 압밀특성과 전단강도 특성과 같은 역학적 특성을 분석하기 위하여 표준압밀시험과 이방압밀삼축시험을 수행하였다. 퇴적물의 이방특성은 이방압밀 삼축압축과 삼축인장 시험을 통해 평가하였으며 이방성을 퇴적환경과 관련하여 비교하였다.

4. 실험결과

남약지역의 지층분포는 지표 부근의 weathered crust, 해성 퇴적층인 연약점토층, 하성 퇴적층인 자갈층 그리고 기반암의 순서로 구성되어 있다. MP-1 지점에서는 해성 퇴적층 하부에 침식과 풍화를 겪은 고토양이 존재하고 있다. MP-2 지점은 실트와 점토의 층리구조가 잘 발달되어 있으며 MP-1은 균질한 퇴적구조를 보이고 있다. 지화학분석, 간극수 화학분석 결과에서 남약지역 해성 퇴적층 내에서 상부와 하부의 경계를 발견할 수 있으며, 그 경계는 MP-1은 EL-8m, MP-2는 EL-11m이다. 퇴

적연대 측정결과를 바탕으로 이 경계는 퇴적속도의 차이에 의한 것으로 판단할 수 있다. 시화지역의 지층은 크게 해성 퇴적층과 하성 퇴적층으로 구분된다. 해성 퇴적층은 실트와 점토의 복합층으로 구성되어 있으며, 하성 퇴적층은 모래와 점토층이 반복적으로 분포하고 있다. 시화지역 해성 퇴적층은 상부의 실트 우세층과 하부의 점토 우세층으로 세분할 수 있다. 시화지역의 지화학 분석결과와 간극수 화학분석, 염분농도 측정 결과에서도 해성 퇴적층과 하성 퇴적층은 분명한 경계를 보이고 있다. 그 경계는 SH-1은 심도 10.5m, SH-2는 심도 13.6m이다. 연구지역 연대측정 결과를 바탕으로 계산한 퇴적속도는 상부와 하부에서 큰 차이를 보이며 상부는 하부에 비해 상대적으로 느린 퇴적속도를 보이고 있다. 퇴적속도의 차이에 의해 퇴적구조, 지화학특성 그리고 간극수화학특성 등이 영향을 받은 것으로 판단된다.

남약지역 해성 퇴적층은 통일분류상 CL, CH로 분류되며 시화지역은 CL로 분류된다. 초기간극비는 남약지역은 1.09~1.57, 시화지역은 0.81~1.24의 범위에 있다. 항복하중은 심도에 따라 증가하며 과압밀비(OCR)는 심도에 따라 감소하며 OCR의 범위는 남약지역은 1.2~3.6, 시화지역은 1.0~3.5이다. 남약지역의 압축지수는 0.52~0.92, 시화지역은 0.10~0.38의 범위를 보이며 심도에 따른 분포는 뚜렷한 경향을 보이지 않는다. 해성 퇴적층의 상부는 과압밀 점토로 분류되는데 그 경계는 남약지역 EL-10m, 시화지역은 EL-7m이다. 남약지역 해성퇴적층의 압밀곡선은 구조화된 특징을 보이고 있으며 시화지역은 구조화된 특징을 볼 수 없다. CKoU 삼축시험으로 구한 K_0 값은 남약지역은 0.32~0.69(평균 0.48), 시화지역은 0.32~0.48(평균 0.41)의 범위를 보이는데 과압밀비에 상관없이 일정한 값을 가지는 것으로 나타났다. 층리구조가 발달된 MP-2 지점의 삼축압축강도와 인장강도는 균질한 퇴적구조를 보이는 MP-1 지점의 값보다 일관되게 큰 값을 보인다. 전단강도비 S_u/σ'_v 은 심도에 따라 감소하는 경향을 보이지만 전단강도비 S_u/σ'_y 은 심도에 상관없이 일정하게 평균 0.35의 값을 보인다.

5. 종합고찰

가. 과압밀 원인

연구지역에서 발견되는 과압밀의 원인을 조사하기 위하여 지질학적으로 침식 여부를 확인하기 위하여 남약지역에서 발견되는, 지질학적 의미의 과압밀토인 고토양과 해성퇴적층의 응력경로 거동을 비교하였으며 역학시험 결과를 응력상태선도에 도시

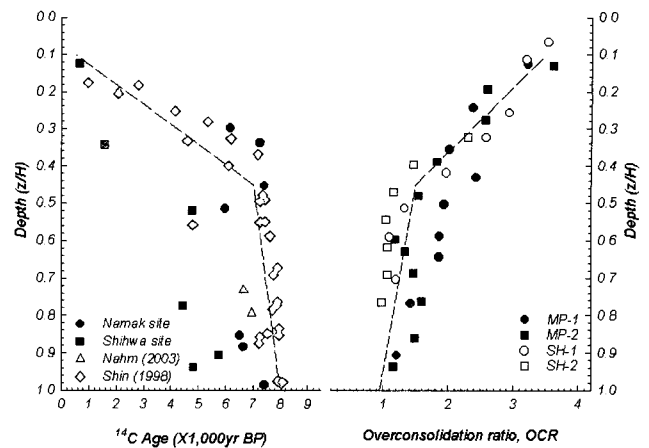


그림 2 퇴적속도와 과압밀비

하여 지질학적 과압밀을 검토하였다. 또한 연구지역의 지형특성을 분석하고 과압밀비의 심도별 분포를 분석하여 지하수위 변동에 의한 과압밀 발생을 검토하였다.

연구지역 퇴적물에 대해 수행한 연대분석 결과를 바탕으로 해성퇴적층이 형성되는 동안 퇴적속도가 크게 변화했다는 것을 알 수 있다. 해성퇴적층이 형성되는 초기에는 퇴적속도가 매우 빨랐으며, 그 뒤부터 현재까지 퇴적속도는 급격하게 감소했다는 것을 알 수 있다. 퇴적속도의 변환점은 약 $z/H=0.4\sim0.5$ 의 심도에 해당하며 이는 OCR의 심도에 따른 변화와도 일관되게 나타나고 있다. 해성퇴적층 내에서 발견되는 cementation agent의 profiles은 퇴적속도의 영향이 반영된 결과로 볼 수 있으며, 해성퇴적층에서 발견되는 과압밀을 발현시키는 근본적인 원인은 퇴적속도의 차이에 의한 것으로 보인다. 퇴적구조는 과압밀비와 크게 상관없는 것으로 보인다. 퇴적속도의 차이는 지화학특성 또는 간극수 화학특성, 점토구조 등에 반영될 것이며 그 정도는 각자의 퇴적환경 차이에 의해 다소 다르게 나타날 것이다.

나. 역학적 특성

연구지역 자연시료의 표준압밀시험결과를 이용하여 점토의 구조화 정도를 나타내는 압축지수비를 계산한 결과 남약지역은 시화지역에 비해 높은 구조화 정도를 보이며 남약지역의 상부 과압밀 점토는 하부의 정규압밀 점토에 비해 높은 구조화 정도를 보인다. 남약 해성점토의 압밀하중에 따른 압축지수의 변화는 전형적인 구조화된 점토의 특성을 보이고 있다. 남약지역과 시화지역의 구조화 정도의 차이는 점토분함량과 시화지역 시료의 교란에 의한 영향으로 해석할 수 있다.

본 연구에서 삼축시험(CKoUC, CKoUE)을 통해 실험적으로 구한 정지토압계수 K_0 을 분석한 결과 일본 해성점토에서와 마찬가지로

가지로 K_0 는 심도와 과압밀비에 상관없이 일정한 값을 유지하고 있으며 소성지수와도 무관하게 나타나고 있다. 즉 겉보기 과압밀은 K_0 의 값에 영향을 주지 못하는 것을 알 수 있다.

점토의 비배수 전단강도를 유효상재하중으로 정규화하여 S_u/σ_{vo}' 의 항으로 표현하면 이방/등방 시험결과를 비교하거나 상재하중 또는 심도에 따른 강도증가를 표시할 때 편리하다. CKoUC와 CKoUE 시험으로 구한 전단강도를 현재 유효상재하중으로 정규화하여 구한 S_u/σ_{vo}' 는 남악과 시화지역 해성 퇴적층에서 모두 심도에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 반면 항복하중으로 정규화한 전단강도비 S_u/σ_y' 는 심도에 따라 일정한 값을 보이고 있다. 비배수 압축시험의 경우 $S_{uc}/\sigma_y' = 0.25 \sim 0.48$ (평균 0.35), 비배수 인장시험의 경우 $S_{uE}/\sigma_y' = 0.14 \sim 0.39$ (평균 0.22)의 값을 보이고 있다.

대부분의 점토에서 인장축에서는 침투강도가 나타나지 않는 것이 일반적인데, 인장 축에서 침투강도가 발견되는 것은 고화된 또는 구조화된 점토의 특성 중 하나이다. 남악지역 해성점토는 응력-변형률 곡선이 대부분 완전 탄소성 거동 또는 변형률연화 거동을 보이고 있기 때문에 구조화된 또는 고화된 점토로 볼 수 있다. 남악지역 상부 과압밀 점토와 하부의 정규압밀 점토는 모두 인장축에서 뚜렷한 침투강도와 파괴시 선명한 necking failure를 보였다. 시화지역 해성 퇴적층에서는 점토가 우세한 시료를 제외한 나머지 시료에서는 인장시험에서 구조화된 경향은 거의 발견되지 않았다.

자연점토의 이방성은 소성지수가 증가할수록 이방성이 감소하는 것으로 알려져 있는데, 지연압밀에 의해 과압밀 특성을 보이는 흙에서는 K_0 값과 함께 비배수강도의 이방성은 OCR에 상관없이 거의 일정한 값을 보인다는 연구결과도 있다. 층리구조가 발달되어 있는 MP-2의 이방성은 평균 0.56의 값을 보이며 균질한 퇴적구조를 가지는 MP-1은 0.53의 평균값을 가진다. 층리구조가 발달한 MP-2 지점의 인장강도는 균질한 퇴적구조의 MP-1보다 큰 값을 보이고 있는데, 이 인장강도의 차이에 의해 이방성이 차이를 보인다. 본 연구지역 해성시료에서 보여진 소성지수에 따른 이방성의 변화는 기존 연구자들의 연구성과와 비교했을 때 정 반대의 경향을 보이고 있는데, 점토분 함량이 증가할수록 그리고 소성지수가 증가할수록 이방성이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 이방성 거동은 실트분 함량, 층리구조, 탄산칼슘함량에 영향을 받은 것으로 판단된다. 이방성은 층리구조가 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 기존 연구결과와 상반되는 본 연구 결과에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

6. 결 론

서해안 간척지에서 발견되는 과압밀현상의 원인을 규명하고 역학적 특성에 미치는 퇴적환경의 영향을 규명하기 위하여 남악지역과 시화지역을 대표지역으로 선정하였다. 현장시험과 함께 다양한 실내시험을 수행하였다. 퇴적구조, 지화학분석, 간극수 화학분석, 그리고 연대측정을 통해 퇴적환경을 분석하였다. 물리적, 역학적 특성은 fall cone, 표준압밀시험, 그리고 이방압밀 삼축압축(CKoUC)시험과 삼축인장(CKoUE)시험으로 분석하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 퇴적환경에 대한 분석 결과, 남악과 시화지역의 해성점토층은 하성환경 퇴적층상부에 놓여 있으며 Holocene 해수면 상승 동안 퇴적되었다. 지질학적 침식이나 지각운동을 겪지 않았음에도 불구하고 해성퇴적층 상부는 과압밀로 나타난다.

2. 연대측정 결과를 바탕으로, Holocene 해성 퇴적층의 형성 동안 퇴적속도는 크게 변화하였다. 퇴적 초기단계에서 퇴적속도는 매우 빨랐으며 그 뒤 퇴적속도는 크게 감소하였다. 퇴적속도는 겉보기 과압밀현상을 지배하는 근본적인 기작으로 판단된다.

3. 퇴적속도의 차이는 지화학 특성, 간극수 화학특성, 점토구조, 퇴적구조에 영향을 미쳤다. 간극수의 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} 이온 농도는 과압밀 현상과 밀접한 관련이 있으며, $CaCO_3$ 함량은 인장강도에 영향을 주는 것으로 나타났다.

4. 해성 퇴적층에서의 과압밀 현상은 지질학적 침식이나 지하수 변화에 의한 것이 아니라 퇴적속도의 차이에 의해 발생하였으며 이로 인하여 점토구조, 특히 점토 입자간 결합력이 차이를 보이고 있다.

5. 전단강도비 S_u/σ_{vo}' 는 심도에 따라 감소하지만, 전단강도비 S_u/σ_y' 는 0.35로 일정하게 나타나고 있다. 과압밀비는 심도에 따라 log 함수 형태로 감소하고 있다.

6. 남악 해성퇴적층은 구조화된 응력-변형률 거동을 보인다. 정지토압계수 K_0 는 남악지역의 경우 0.48, 시화지역의 경우 0.41로 일정하게 나타나며 과압밀비(OCR)에 독립적이다.

7. CKoUC와 CKoUE로 구한 연구지역의 이방성은 일반적으로 알려진 이론과 상반되는 경향을 보이고 있다. 연구지역의 이방성은 소성지수와 점토분 함량이 증가할수록 증가한다. 이러한 현상은 층리구조와 탄산칼슘 함량의 영향으로 설명할 수 있다.

8. 해성퇴적층의 압밀특성과 강도특성간의 상관관계를 분석하여 경험식을 제안하였다.