

부산시 범방동 지역에 분포하는 부산점토의 토목지질학적 특성

Engineering Geological Characteristics of Pusan clays in Beombangdong area, Pusan city

류춘길¹⁾, Choon-Kil Ryu, 정성교²⁾, Sung-Gyo Chung, 백승훈³⁾, Seung-Hoon Baek, 강소라¹⁾, Sora Kang

¹⁾ 부산대학교 지질학과 박사, Ph. D., Dept. of Geology, Pusan National University

²⁾ 동아대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Dong-A University

³⁾ (주)가야이엔지 이사, Director, Gaya ENG

개요(Synopsis) : In the estuary of Nagdong River thick marine sediments were deposited by the Holocene marine transgression. The sediments largely consist of silty clay, which is called Pusan clays in the geotechnical field. This paper presents engineering geological characteristics of Pusan clays in Beombangdong area. Overall geological environmental changes based on several geological properties are discussed and synthesized as Geological Environmental Zones. And also, engineering properties of the clays in laboratory and field are discussed and synthesized as Engineering Zones. Two zones are correlated and engineering characteristics are evaluated in view of engineering geology.

주요어(keyword) : Holocene marine transgression, Pusan clays, engineering geology, Geological Environmental Zones, Engineering Zones

1 서언

낙동강 하구 주변의 연·해안 지역에는 제4기 말 홀로세(Holocene) 초의 해침(marine transgression)

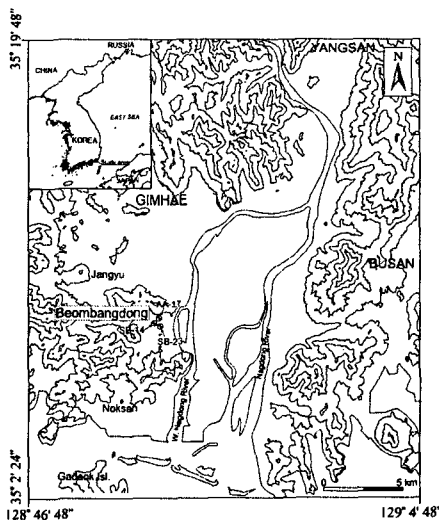


그림 1. 연구지역의 위치.

으로 형성된 해성 퇴적층이 널리 분포하고 있다. 이러한 해성 퇴적층은 부산 점토(Chung et al., 2002a)라 불리는 두꺼운 점토질 퇴적층이 주체를 이루고 있다. 최근까지 부산점토에 대한 공학적 특성을 규명하기 위한 연구 및 과대 침하에 대한 원인규명을 위한 연구가 활발히 진행되어왔음에도 불구하고, 여전히 지반의 공학적 특성 및 과대 침하의 원인규명에 대해서는 명쾌하게 밝혀지지 못하고 있으며, 또한 개량된 지반 위에 축조될 구조물을 위한 적절한 기초공법의 채택에 대해서도 어려움을 겪고 있다(정성교 외, 2002).

이러한 문제점을 해결하기 위해서 정성교 외(2001)와 Chung et al.(2002b)은 시료 채취 방법 및 횡수, 시료 교란 등의 현장조사 기술, 압밀 및 수리학적 특성 평가, 현장 시험의 실질적 적용 등 지반 공학적 측면의 개선 사항 등을 지적하면서 아울러, 과거의 퇴적환경, 퇴적조건과 퇴적연대를 포함한 지질학적 특성 및 토목지질학적 특성 조사의 필요성을 제기하였다.

이 연구에서는 범방동 지역(그림 1)의 부산 점토에 대해 퇴적환경 및 퇴적 후 지질학적 작용을 검토하고 이를 종합하여 지질환경 변화라는 관점에서 지층을 분대하였

다. 또한, 이러한 지층 분대가 공학적 관점에서의 지층분대와 상관관계가 있는지를 검토하고 공학적으로 상이한 각 지층의 토질 특성에 대한 지질학적 원인 분석을 시도하였다. 이러한 연구는 연약지반을 구성하는 점토 퇴적층의 공학적 특성을 이해하고 이상 특성의 원인을 분석할 수 있을 뿐만 아니라 공학적 지층분대(engineering zoning)의 정밀성을 보완함으로써 연약지반의 설계와 시공에 반영할 수 있는 직접적인 기초 자료가 될 수 있을 것으로 기대된다.

2 지질학적 지층분대

범방동 지역 부산 점토의 종합적인 지질환경 변화라는 관점에서의 지질학적 지층분대를 시도하였다. 점토 퇴적층의 퇴적상, 점토광물 조성과 유공층 화석군집을 분석하여 퇴적환경의 변화를 파악하고, 간극수 양·음이온 함량, 염도 및 수소이온농도 등의 지구화학적 특성을 기초로 퇴적 당시와 퇴적 후에 받았던 지질작용의 영향을 파악하였다.

2.1 퇴적상(Sedimentary facies)

입도 분석 자료 및 퇴적물 유형을 기초로 하고 시추 코어에서 관찰되는 퇴적층의 조직, 퇴적구조, 구성 물질 등의 여러 퇴적학적 특징을 종합하여 제4기 퇴적층 전체에 대한 퇴적상을 분석하였다. 그 결과, 최상부의 매립층을 제외하고 퇴적학적 층서단위로서 총 7개의 퇴적상이 설정된다(그림 2).

최하부의 사층리 자갈질 모래(Gsx)와 최상부의 암황갈색 평행엽층리 니(Dylm) 퇴적상은 육성환경의 산물로서 각각 하도 충진 퇴적층과 범람원 퇴적층으로 해석된다. 해성환경의 산물로 판단되는 기타 구간에서도 다양한 퇴적학적 특징에 따라 여러 퇴적상으로 구분된다. 퇴적층 전반에 걸쳐 생물교란작용의 영향이 관찰되고 특히, 18m 이하의 녹회색 괴상니(Gmm)와 괴상니(Mm) 퇴적상에서는 건조작용에 의한 퇴적구조인 건열이 특징적으로 발달한다. 건열은 하위의 녹회색 괴상니 퇴적상에서 더 큰 규모로 관찰되며 녹회색의 다소 이질적인 색조를 띤다. 상부의 함패각편 괴상니(Smm) 퇴적상에서는 다량의 패각편과 함께 탄산염 결핵체가 쉽게 관찰되며 함패층 괴상니(Sbrmm) 퇴적상에서는 자갈 크기의 패각편이 층리를 형성하고 있는 특징을 보인다. 해성층의 최상부를 점하고 있는 황갈색 평행엽층리(Ylm) 퇴적상은 다량의 유기물과 산화작용의 영향을 특징으로 한다.

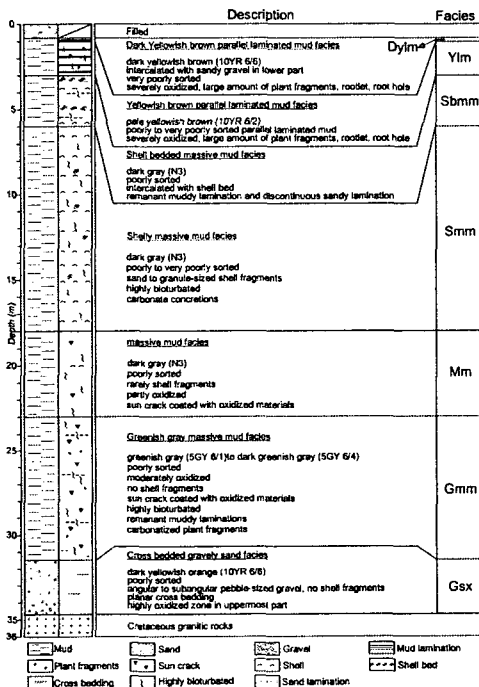


그림 2. 퇴적학적 층서단위.

2.2 저서성 유공층 화석군집(Benthic foraminiferal fauna)

점토 퇴적층을 대상으로 어느 한 시료에서 5% 이상 산출되는 주요 종을 대상으로 상대적인 산출율의 변화를 도시하고 이를 기초로 총 6개의 군집대로 구분할 수 있다(그림 3). 특징적으로 지층의 최하부와 최상부에서는 유공층의 산출이 저조한 무화석대가 나타난다. 최하부의 무화석대 구간에서는 연안(littoral) 및 담수성 규조들이 산출되고 있어 담수의 영향을 받는 연안성의 퇴적환경을 지시하고 있다. 유공층의 산출이 양호한 상부 구간에서는 하위로부터 *Ammonia beccarii*-*Buccella*, *frigida* *Elphidium subarcticum*-*Elphidium somaense*, *Quinqueloculina seminulum*-*Elphidium somaense* 및 *Ammonia beccarii*-*Elphidium somaense*의 군집대 순으로 그 조성 변화를 보이고 있다. 이는 직접적인 해양 퇴적환경의 변화를 지시하는 것이다.

2.3 지구화학적 특성(Geochemistry)

미화석 분석과 동일한 점토 퇴적물 시료에 대해 여러 지구화학적 특성을 산출하고 결과를 그림 4에 나타내었다. 모든 특성치에 있어서 심도에 따른 변화 양상이 뚜렷하게 잘 관찰되고 있다. 이를 기초로 점토층에 대해 퇴적환경 변화를 지시하는 지구화학적 분대는 전체적인 염도의 변화로부터 18m 미만의 저염도 구간, 18m~4m 사이의 고염도 구간, 그리고 4m 이상의 저염도 구간으로 구분할 수 있다. 또한, 각 분대 내에서도 상대적인 염도 차이로 보다 세분된 소분대가 가능하다.

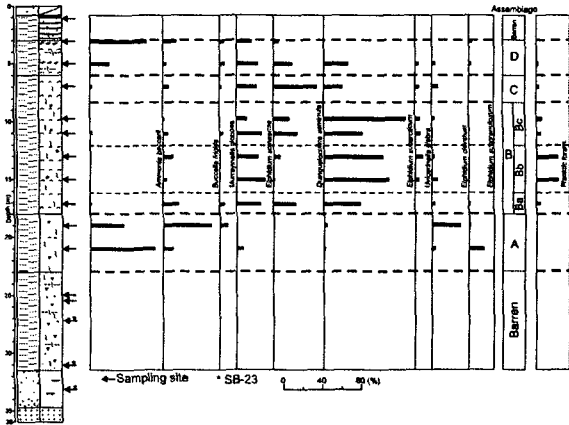


그림 3. 저서성 유공충 화석군집.

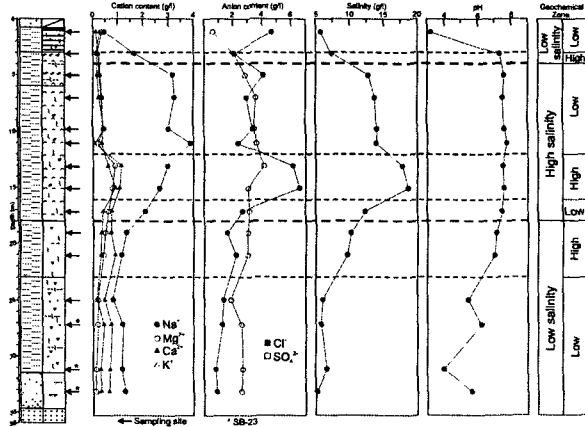


그림 4. 지구화학적 특성.

2.4 지질학적 환경 분대(Geological environmental zoning)

2.4.1 GEZ I (조간대)

31.5m에서 18.0m 구간으로서 하부의 녹회색 괴상 니, 상부의 괴상 니 퇴적상으로 구성되는 지층이다.

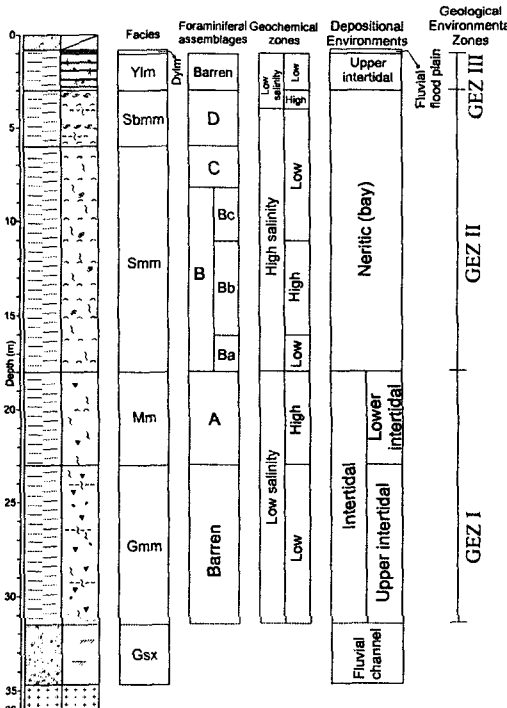


그림 5. 지질환경분대.

하부 퇴적층에서 나타나는 퇴적물의 부분적 산화, 건열 구조, 다량의 식물 파편 등은 대기 중 노출에 의한 특징으로 상부 조간대 퇴적층에서 흔히 관찰된다(Klein, 1977). 상부 퇴적상은 하부층에 비해 대기 중 노출의 특징이 대체로 약하게 나타나고 패각편이 출현하기 시작하는 것으로 미루어 저조면(low tide level)에 가까운 하부 조간대 퇴적상인 것으로 해석된다.

미화석 분석에서 하부의 퇴적층에서는 유공충은 산출되지 않으나 연안 및 담수성 구조가 산출되고 있어 담수의 영향을 많이 받는 상부 조간대의 퇴적 환경을 뒷받침하고 있다. 상부층에서는 *A. beccarii*-*E. somaense*의 군집대를 갖는 저서성 유공충이 산출되기 시작하여 하부층 보다는 담수의 영향이 줄고 해수의 영향이 점차 증대했음을 지시하고 있다. *A. beccarii*는 세계적으로 거의 모든 유공충 군집에 산출하는 광염성(euryhaline) 종으로서 해성 석호, 조석 하도, 조간대, 수심이 낮은 조하대, 하구와 만에 풍부하게 산출하는 것으로 알려져 있다(Cann et al., 1993).

저염도로 대표되는 지구화학적 특징은 이러한 퇴적 환경과 잘 일치하며 특히, 상부로 갈수록 염도가 점차 증가하는 경향은 이 구간 내에서의 해수의 영향이 강해지는 즉, 해수면의 상승에 따른 환경 변화를 직접적으로 반영하고 있다. 또한, 하부층에서의 수소이온농도는 6 미만으로 상부층에 비해 보다 높은 산화환경의 영향을 지시하고 있다.

2.4.2 GEZII (내만성 천해)

18.0m~3.02m 구간으로서 하부의 함패각 피상 니, 상부의 함패층 피상니 퇴적상으로 구성된다. 하부층은 층리 등의 일차적인 퇴적구조 뿐만 아니라 연흔, 사구 등의 유수에 의한 구조 등도 전혀 발달하지 않고 있어 천해의 대륙붕 점토 퇴적층과 유사한 특징을 보인다. 상부 퇴적상은 하위의 퇴적상과 유사하나 수 때의 패층이 협재되고 사질 염층리가 일부 발달하는 점에서 차이를 보인다. 이는 이 구간의 상부로 갈수록 수심 감소에 따라 조류나 해류의 영향이 점차 증대되고 있음을 지시하는 것으로 생각된다.

저서성 유공충 군집조성은 하부로부터 *E. subarcticum*-*E. somaense*(군집대 B), *Q. seminulum*-*E. somaense*(군집대 C), 및 *A. beccarii*-*E. somaense*(군집대 D) 군집대로 구성된다. 전체적으로는 가장 높은 산출을 보이는 *E. subarcticum*은 만의 중앙부(middle bay)와 외부(outer bay)에 집중적으로 분포하며 만의 내부(inner bay)에는 산출되지 않는 종으로 알려져 있다(Matoba, 1970).

따라서 하부 구간은 수심이 다소 깊은 내만역의 천해 환경에서 형성되었을 것으로 추정되며 *A. beccarii*가 출현하는 상부 구간은 하부보다는 다소 수심이 얕은 퇴적환경으로 점이적인 변화를 거쳤을 것으로 생각된다. 또한, 하부 구간을 대표하는 군집대 B에서는 수반종인 *Q. seminulum*과 부유성 유공충의 산출율에 따라 다시 세 개의 아군집대로 구분되고 있다. 이러한 유공충 군집조성의 변화는 염도 변화로 대표되는 지구화학적 특성 변화와 잘 일치한다. 가장 높은 염도를 보이는 구간은 부유성 유공충의 높은 산출율과 잘 일치하고 있으며, 이는 해수면 상승의 극대기로 표현될 수 있을 것이며 이후는 해수면의 안정기에 해당할 것이다. 이 구간의 최상부에서의 유공충 군집조성의 변화는 해수면이 다시 하강하면서 수반된 변화임을 간접적으로 지시하는 것으로 생각된다.

2.4.3 GEZIII (조간대)

3.02m 이상의 구간으로 황갈색 평행염층리 니 퇴적상을 보이는 퇴적층이다. 다량의 식물편, 식물 뿌리 및 식물 줄기 등과 심한 산화작용 등은 대기 중 노출을 특징으로 하는 상부 조간대 환경을 지시한다. 지구화학적 특성에서 보듯이 여전히 담수 보다는 높은 염도를 유지하고 있으며 매우 낮은 수소이온농도를 유지하고 있어 이를 뒷받침하고 있다.

3 공학적 지층분대(Engineering Zoning) 및 토질 특성

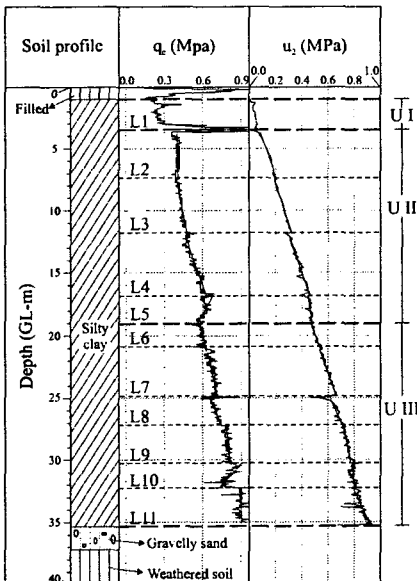


그림 6. CPTU에 의한 공학적 지층분대.

지반공학적 관점에서의 지층분대는 퇴적층의 물리·역학적 성질을 종합적으로 반영하는 피에조콘 시험(CPTU)을 기초로 실시하였다. Powell and Quarterman(1995)은 피에조콘 시험 결과를 이용하여 상이한 흙으로 구성되어 있는 지층을 구분하는 데 신뢰성 있게 적용한 바 있다. 최근, 부산 점토에 대해 백승훈(2003)은 심도에 따른 q_t 와 u 의 기울기와 절대값의 변화를 기준으로 지층이 세분되며, 세분된 지층별 현장 및 실내 토질시험값은 거의 일정한 것으로 보고한 바 있다.

그림 6은 피에조콘 시험 결과를 이용하여 연구 지역별로 지층 분대를 실시한 결과이다. 이 그림에서는 2.5cm~10.0cm 간격으로 읽혀진 콘지수(cone resistance, q_c)와 과잉간극수압(excess pore water pressure, u_2)의 값들을 이용하여 동일한 기울기를 가지는 구간을 동일 지층으로 간주하여 지층 분대를 실시하였다. 그림과 같이 약 19m 지점을 기준으로 상부 보다는 하부 점토층에서 콘지수와 과잉간극수압의 전체적인 증가율이 약간 크게 나타나고 있어 이 지점에서 대분

대가 이루어진다. 특히, 콘지수에 있어서는 하부 점토층에서의 변화가 다소 복잡한 양상을 띠고 있다. 기울기의 변화에 따라 총 11개의 소지층으로 구분되고 있다. 공학적 분대에 따른 토질 특성을 살펴보면 다음과 같다. 대표적인 물리적 성질과 역학적 성질을 종합하여 그림 7과 8에 도시하였다.

입도는 수직적으로 뚜렷한 변화는 관찰되지 않고 대체로 균질한 분포를 보이거나 지층 하부에서 점토 함량이 약간 증가하는 경향을 띤다. 아터버그 한계와 기타 지수 특성을 보면, 소성한계의 수직적 변화에 비해 자연함수비와 액성한계의 변화가 다소 크며 뚜렷한 경향성을 보인다. 액성지수는 20m 이상에서는 1.5에 가깝게 분포하고 그 이하에서는 1.0에 가까운 분포를 보이고 있어 상이한 양상을 보인다. 활성도는 0.61~0.97의 범위로서 약 20m를 기준으로 상부 점토층에서 약간 높은 값을 보인다.

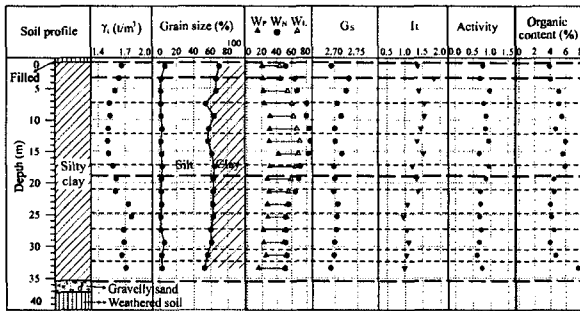


그림 7. 물리적 성질.

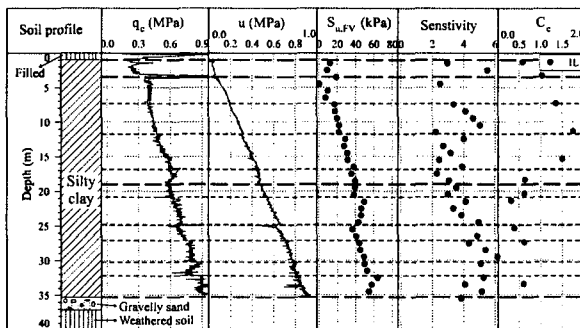


그림 8. 역학적 특성.

현장배인전단시험으로 구한 점토 퇴적층의 비배수 전단강도는 지층 전체를 통해 심도가 깊어지면서 증가하는 일반적인 경향을 보이고 있으며, 전체적으로 피에조 콘 시험과 유사한 결과를 보인다. 약 19m 지점을 중심으로 그 상부에서는 보다 안정적이고 점진적인 변화 양상을 보이거나, 하부에서는 구간마다 증가율이 둔화되거나 감소하기도 하는 다소 불규칙한 양상을 보인다. 예민비는 지층의 중상부와 하부 구간에서 약간 높은 값을 보이기는 하나, 전체적으로 2~6 사이의 협소한 범위를 보이고 있어 그 수직적 분포에서 뚜렷한 경향성은 나타나지 않는다. 대체로 20m를 기준으로 하부층에서 약간 높은 값을 보인다. II 시험을 통한 압축지수(C_c)는 약 17m를 기준으로 상·하부 지층에서 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 즉, 지층 상부는 1.5 내외의 값을 가지나 하부는 0.5 내외로서 상대적으로 낮은 값을 나타내고 있다. 또한, 최상부층은 하부층과 유사한 값을 가지고 있어 상부층과의 구분이 가능하다.

4 지층 분대의 대비

지질학적 특성을 종합한 지질환경 분대와 공학적 특성을 종합한 공학적 분대를 대비한 결과를 그림 9에 나타내었다.

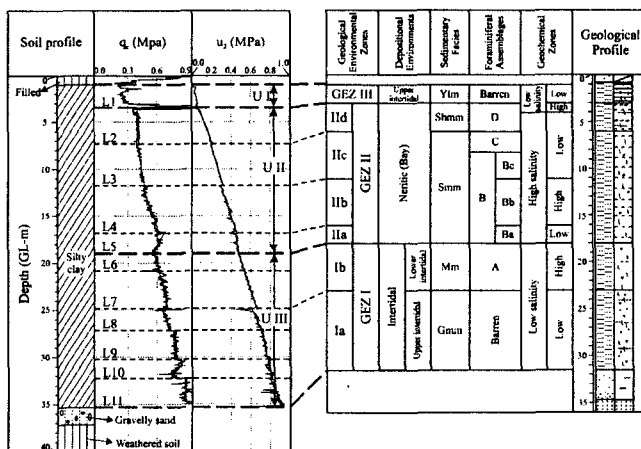


그림 9. 지질환경분대와 공학적 분대의 대비.

거의 모든 대분대 및 소분대 경계에 있어서 약간의 심도 차이가 나타나나, 이는 분석된 각 시추공의 수평적인 거리 차이에 기인한 각 분대별 지층의 수평적 두께 변화에 따른 영향이며 그 차이는 대체로 2m를 넘지 않고 있으므로 실질적인 지층 대비에는 무리가 없을 것이다. 따라서 심도에 따른 공학적 특성의 변화는 지질환경 변화와 매우 밀접한 연관성을 갖고 있음을 알 수 있다.

5 분대별 토질특성과 지질학적 상호관계

지질환경 변화라는 관점에서 공학적 특성이 상이하게 나타나고 있는 지질학적 원인에 대해서 지반의 토질 특성을 대표할 수 있는 몇몇 물리적 특성과 역학적 특성을 대상으로 접근해 보고자 한다.

5.1 단위중량과 간극비

일반적으로 퇴적물의 단위중량과 간극비는 서로 강한 부의 상관관계를 가진다. 퇴적물의 간극은 입자 간의 배열 상태, 접촉 관계 및 팩킹(packing) 정도 등의 미세구조와 깊은 관련이 있다. 이 관계를 이용하여 지질환경 분대별로 도시한 결과 그 분포가 뚜렷이 구분된다(그림 10). 조간대 환경의 최하부와 최상부 지층에서는 낮은 간극비를 보이고 내만성 천해 환경인 중간부에서는 높은 간극비를 나타내고 있다.

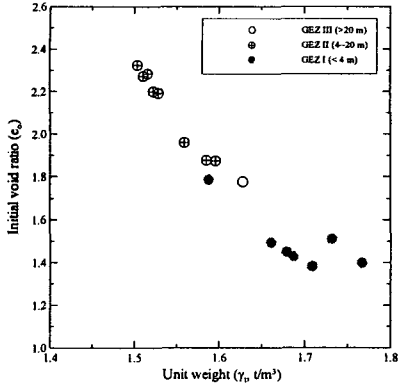


그림 10. 단위중량과 간극비.

조간대는 대기 중 노출에 의한 건조가 규칙적으로 일어나는 환경으로 이에 따라 퇴적물의 반복적인 수축에 의해 간극비 감소가 수반된다. 또한, 이러한 환경은 저해수면 시기로서 담수의 영향으로 낮은 염도 특성을 갖는다. 이는 점토 퇴적물의 침강 및 퇴적 유형에 영향을 미쳐 낮은 면모화 구조(flocculation)의 특성을 띠므로써 상대적으로 낮은 간극비를 갖게 된다. 이와는 달리 내만성 천해 환경에서는 상대적으로 고염도와 일정한 수심을 유지하는 조건에 의해 보다 높은 간극비 특성을 갖게 된다. 즉, 고염도에 따른 높은 면모화 구조와 일정한 수심에서의 안정된 침강은 상대적으로 높은 간극비를 갖게 된다.

5.2 액성한계

액성한계는 흙 입자의 비표면적과 깊은 관련이 있다. Mitchell(1993)은 비표면적이 클수록 액성한계 상태의 조건을 만족시키는 데 필요한 물의 총량은 더 많아진다고 하였다. 따라서 액성한계는 기본적으로 퇴적물의 입도 특성, 즉 점토 함량과 밀접한 관련이 있을 것이다. 이는 대체로 한정된 입도 범위 내에서는 점토광물의 종류에 지배된다고 볼 수 있다. 또한, Bjerrum(1954)은 해성 점토의 염류용탈 실험을 통해 염도의 감소에 따라 함수비와 소성한계는 변하지 않으나 액성한계는 상당한 감소가 일어남을 제시한 바 있다. 연구지역의 점토 퇴적층의 심도에 따른 입도와 점토광물 조성은 대체로 일정하게 나타나고 있어 염도에 보다 지배될 것으로 판단된다. 염도와 액성한계의 상관관계를 보면, 지질환경 분대에 따라 액성한계의 분포가 구분되고 있어 퇴적환경의 차이와 밀접한 관련성이 있음을 지시하고 있다(그림 11).

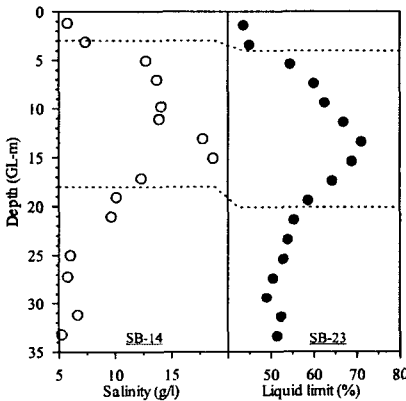


그림 11. 액성한계와 염분도.

5.3 소성지수-액성한계

소성도표에 있어서 몇몇 시료를 제외하고는 대체로 무기질 점토 영역에 도시되며, 지질환경 분대에 따라 뚜렷한 분포 차이가 나타난다(그림 12). 이러한 특징은 전술한 바와 같이 액성한계가 퇴적환경 변화와 밀접하게 관련된 분포를 보이고 있기 때문이다.

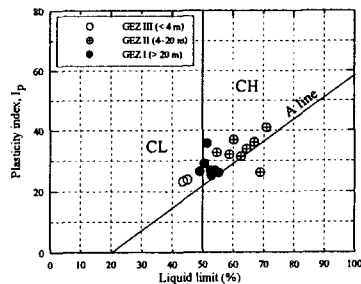


그림 12. 소성도표.

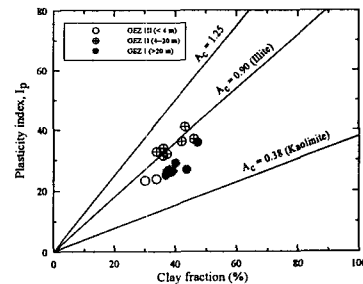


그림 13. 활성도.

5.4 활성화도

소성지수와 점토분 함량의 관계로 표시되는 활성화도는 점토광물의 종류와 밀접한 관련을 갖는다 (Skempton, 1953). 그림 13과 같이 내만성 천해환경 구간에서 다소 높은 활성화도가 관찰되며 이는 이 구간에서 높은 일라이트 함량과 소량의 스펙타이트가 출현하는 것과 깊은 관련이 있다(류춘길, 2003).

5.5 현장압축 특성

연약지반의 침하 특성을 파악하는 데 기본적인 검토해야 할 필수적인 사항으로는 점토 퇴적층의 압축 특성을 들 수 있다. 특히, 압축 특성에 대한 분석은 그동안 낙동강 하구 주변의 연약지반에서 발생했던 과대 침하의 원인을 규명하는 데 중요한 사항이다(정성교 외, 2002). 연구 지역 점토 퇴적층의 현장 상태에서의 압축 특성을 Burland(1990)의 고유압축선(ICL)과 Nagaraj et al.(1990)의 고유상태선 개념으로부터 추정하였다. 유효응력 증가에 따른 간극비 지수의 변화를 ICL, SCL과 함께 나타내고(그림 14) 또한, 함수비 지수의 변화를 ISL과 함께 도시하였다(그림 15). 그 결과, 모두 SCL 위에 존재하고 있어, SCL을 결정할 때 이용한 유럽 지역의 점토들 보다는 교결작용이 아주 발달되어 있다고 할 수 있다. 또한, ISL을 기준으로 파악하면 모두가 ISL의 위쪽인 자연교결점토 영역에 존재하고 있다.

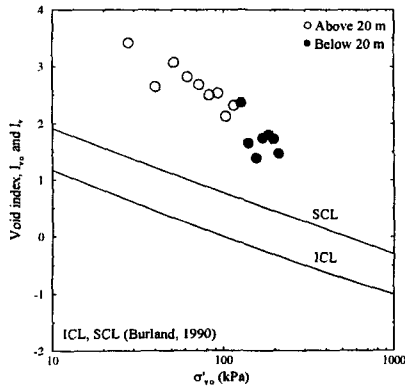


그림 14. 간극비 지수를 이용한 현장압축 특성.

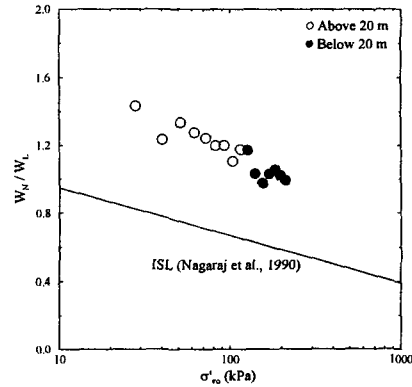


그림 15. 함수비 지수를 이용한 현장압축 특성.

점토 퇴적층의 교결 특성은 직접적인 교결작용의 영향으로 해석된다. 하부층을 제외하고 거의 10g/l 이상의 염도로서 높은 전해질의 농도를 유지하고 있다. 이는 퇴적물의 입자간 결합력을 증대시키고 유지시켜주는 직접적인 역할을 하며, 해성 퇴적층의 대표적인 교결물질인 탄산염의 포화 및 침전과 직접적인 관련을 갖는다. 상부 퇴적층에서 측정된 탄산염 함량은 약 3%~9%의 범위로 보고된 바가 있어 (Chung et al., 2002b) 탄산염 물질이 교결물질로서 주된 역할을 했을 것이라는 사실을 뒷받침한다. 하부층에서는 산화작용의 증거가 뚜렷이 관찰되고 있어 산화물이 주된 교결물질로서 작용한 것으로 판단된다.

지질환경 분대 및 공학적 분대로 대별된 상·하부 지층의 경계를 중심으로 유효응력 증가에 따른 각 지수 특성의 기울기가 변하고 있다. 하부층에서 기울기가 다소 급하게 변화는 이유는 간극비의 감소에 기인한 것으로 판단할 수 있다. 이는 앞서 물리적 특성에서 논한 바와 같이 하부의 조건대 퇴적층이 갖는 낮은 간극비 특성에 기인하는 것으로 근본적으로 퇴적환경의 차이에 기인된 결과로 해석할 수 있다.

6 결론

1) 다양한 지질학적 특성을 기초로 하부로부터 조건대-내만성 천해-조건대로의 종합적인 지질환경 변화 및 그 분대가 설정되며, 이러한 지질환경 분대와 피에조콘 시험을 통한 공학적 분대와의 대비를 시도해본 결과 각각 3개의 지질환경 분대와 공학적 분대가 거의 일치하고 있다.

2) 간극비의 분포는 하부 조건대 환경에서 가장 낮고 중간부의 내만성 천해환경에서 가장 높게 나타

나며 상부의 조하대 환경에서는 양자의 중간에 위치하는 값을 가진다. 조간대 환경에서 낮은 간극비를 갖는 지질학적 원인은 반복적인 대기중 노출에 의한 건조작용으로 점토 퇴적물의 수축에 따른 간극비의 감소와 저염도 특성에 기인한 낮은 면모화 작용에 기인하는 것으로 해석된다. 액성한계는 퇴적환경 변화를 대표하는 염도 특성의 변화에 지배되는 것으로 지질환경 분대에 따른 염도와 액성한계의 수직적 변화 경향성은 대체로 잘 일치하고 있다. 활성도는 전체적으로 일라이트의 영역에 도시되는 양상을 보이고 있으며 이는 연구 지역 점토 퇴적층의 주 점토광물이 일라이트로 분석된 결과와 일치한다. 또한, 각 지역 상부의 내만성 천해 퇴적층에서는 소량의 스멕타이트가 관찰되고 있는 데, 이 영향으로 상부층에서 활성도가 다소 증가하는 경향을 보인다.

3) 현장 압축 특성으로부터 연구 지역의 점토 퇴적층은 유럽 지역에 비해 상당히 교결작용이 진행된 것으로 나타난다. 이는 조간대 퇴적층에서는 철산화물, 내만성 천해 퇴적층에서는 탄산염 물질의 교결작용에 기인된 것으로 해석된다. 또한, 유효응력증가에 따른 간극비 지수와 함수비 지수의 변화에서는 하부의 조간대 환경과 상부의 내만성 천해로 대별되는 지층 경계에서 기울기가 급변하는 양상을 보이며, 이러한 변화는 하부 조간대 환경에서의 상당한 간극비의 감소 따른 것으로 해석된다.

참고문헌

1. 류춘길, 2003, “낙동강 하구 일원에 분포하는 홀로세 해성 점토질 퇴적층의 토목지질학적 특성”, 부산대학교 이학박사 학위논문, 230p.
2. 백승훈, 2003, “현장실험에 의한 부산점토의 토질특성 분석”, 동아대학교 공학박사학위 논문, 262p.
3. 정성교, 광정민, 김규중, 백승훈, 2001, “부산점토의 지반공학특성에 관한 고찰”, 국내 퇴적층의 토질특성 및 지반개량대책, ISSMGE, ATC-7 심포지움, 13 Sept., pp. 25-41.
4. 정성교, 광정민, 장우영, 김덕곤, 2002, “낙동강 하구 점토의 압축특성에 관한 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제18권, 제4호, pp. 295-307.
5. Burland, J.G., 1990, “On compressibility and shear strength of natural clays”, *Geotechnique*, 40, pp. 329-378.
6. Cann, J.H., Belperio, A.P., Gostin, V.A. and Rice, R.L., 1993, “Contemporary benthic foraminifera in Gulf St. Vincent, South Australia, and a refined Late Pleistocene sea level history”, *Aust. J. Earth Sci.*, 40, pp. 197-211.
7. Chung, S.G., Giao, P.H., Kim, G.J. and Leroueil, S., 2002a, “Geotechnical properties of Pusan clays”, *Canadian Geotechnical Journal* (accepted).
8. Chung, S.G., Giao, P.H. and Tanaka, H., 2002b, “Geotechnical characteristics and engineering problems of Pusan clays”, *International Workshop on Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, Nov., Singapore, Balkema (submitted).
9. Klein, G. deV., 1977, *Clastic tidal facies*, Continuing Education Publication Company, Illinois, 149p.
10. Nagaraj, T.S., Murthy, B.R.S., Vatsala, A. and Joshi, R.C., 1990, “Analysis of compressibility of sensitive soils”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 116, pp. 105-119.
11. Mitchell, J.K., 1993, *Fundamentals of soil behavior*. 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., 437p.
12. Powell, J.J.M. and Quarterman, R.S.T., 1995, “Engineering geological mapping of soft clay using the piezocone”, *Proc. Intl. Symp. Cone Penetration Testing, CPT '95*, Linköping, Sweden, 2, Swedish Geotechnical Society, pp. 263-268.
13. Skempton, A.W., 1953, “The colloidal activity of clay”, *Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, I, pp. 57-61.