

공학적/지질학적 관점에서 본 영종도 퇴적지반의 특성 Characteristics of Youngjong Deposits with Engineering and Geological Standpoints

김주형¹⁾, Ju Hyong Kim, 최경식²⁾, Kyung-Sik Choi

¹⁾ 한국건설기술연구원 선임연구원, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology

²⁾ 전남대학교 교수, Professor, Chonnam National University

SYNOPSIS : It is essential to carry out site investigations such as SPT, CPT sampling etc. to understand the characteristics of soil deposits. However, the results deduced only from the engineering standpoint have limited information to fully understand ground characteristics. In this study, it is discussed site investigation results on Youngjong deposits obtained from not only the geotechnical standpoint, but also geotechnical and geological mixed standpoint to understand correct characteristics of Youngjong soil deposit.

Keywords : soil deposits, paleosol, geotechnical analysis, geological analysis

1. 서론

인천국제공항, 영종대교, 인천신항만, 인천대교, 송도 신도시 등 대규모 건설프로젝트들이 인천 해안지역을 중심으로 활발히 전개되고 있다. 여러 대규모 건설프로젝트가 진행되고 있는 만큼 다양한 지반조사 방법을 이용하여 이 지역의 지반상태를 분석하고 관련 구조물의 기초를 설계하고 있다. 그러나, 이미 수행된 지반조사 결과와 인근지역에서 재조사한 결과가 비슷하지 않은 경우가 많다. 이는 근본적으로 인천지역의 퇴적이력이 매우 복잡한 이유도 있지만, 현장 지반조사자의 지반 또는 지질에 대한 지식 부족과 경험에서 오는 매너리즘에 기인하기도 한다. 예를 들면, 지반조사 보고서에 수록된 지질주상도 및 표준관입시험 결과 및 지반상태 서술 내용은 지반조사자의 주관적인 경험에 따라 작성되기 때문에 실제로 동일한 성질의 지층을 지반조사자에 따라 다른 성질의 층으로 서술하는 오류가 반복적으로 발생하게 된다. 이는 지반의 특성을 강도, 압축성 등의 공학적으로만 좁게 분석하기 때문이며, 좀 더 넓은 관점의 지질학적 관점에서 함께 분석한다면 복잡한 인천 지역의 퇴적층의 특성을 보다 쉽게 평가할 수 있다. 본 논문에서는 기존 공학적인 관점에서만 논의된 영종도지역의 지반 특성을 지질학적인 관점으로 분석한 Choi (2001), Choi and Kim(2006)의 연구결과를 재구성하여 공학적/지질학적 관점에서 함께 본 영종도 지역의 지반/지질 특성 분석내용을 소개하고자 한다.

2. 영종도 지역의 지반 특성

2.1 공학적 관점

일반적으로 지반 특성을 공학적으로 분석하기 위해서 가장 많이 사용하는 시험방법은 표준관입시험을 수행하여 대략적인 지층을 구분하고 채취된 교란시료를 이용하여 함수비, 시료의 크기 등을 육안으로 관찰하여 평가하는 방법이다. 시료 채취가 가능한 점성토에 대해서는 불교란시료를 채취하여 흙의

압축성 및 전단강도 등을 실내시험을 통하여 평가할 수 있다. 최근에는 콘관입시험 (CPTU) 등의 사용이 일반화 되어 중요 구조물의 경우에는 콘관입저항력(q_c), 간극수압(u_{bt}), 슬리브마찰력(f_s) 등을 측정하여 지반을 연속적으로 평가하기도 한다. 2001년에 개항한 인천국제공항 건설지인 영종도에서도 표준관입시험, 콘관입시험을 비롯하여 다양한 실내물성시험을 수행하였다. 표 1은 다양한 지반조사 결과를 바탕으로 요약한 영종도 지역의 원지반 지질 주상도로써 상부 3~5m 정도의 매립층, 실트질 점토로 구성되어 있는 상부퇴적층, 실트질 또는 모래로 구성되어 있는 상부충적층, 점토로 구성되어 있는 하부해성층, 그리고 조립토로 구성되어 있는 하부충적층과 잔류토층 등으로 구분된다 (김주형 등, 2000). 그림 1에는 지층 깊이에 따른 자연함수비, 아터버그한계, 과압밀비, 그리고 압밀계수 분포를 나타낸 것인데, 상부충적층으로 구분된 6~10m 층의 흙은 통일분류법상 ML 또는 SM으로 불교란 시료 채취가 어려워 압밀과 관련 시험자료는 없다.

표 1. 영종도 지역의 대표적인 원지반 지질 주상도 (김주형 등, 2000)

Depth(m)	Soil Stratification	w_n (%)	I_p (%)	w_l (%)	$c_v \times 10^{-3}$ (cm ² /sec)	N-value	q_c (kg/cm ²)	U.S.C.S
0	Upper Clayey Soil	26.3~39.4	3.6~23.9	30.0~40.2	2~28	0~6	1~10	ML~CL
6	Upper Alluvial Soil	27.7~33.7	-	-	-	1~50	20~203.8	ML~SM
10	Lower Clayey Soil	25~33.4	17.6~29.1	30.0~44.2	1~15	4~33/30cm	13.1~327	ML~CL
16	Lower Alluvial Soil	15.2~26.6	-	-	-	15~50/13cm	-	SM
35	Weathered-Residual Soil	16.7~18.3	NP	NP	-	38/30~50/7cm	-	-

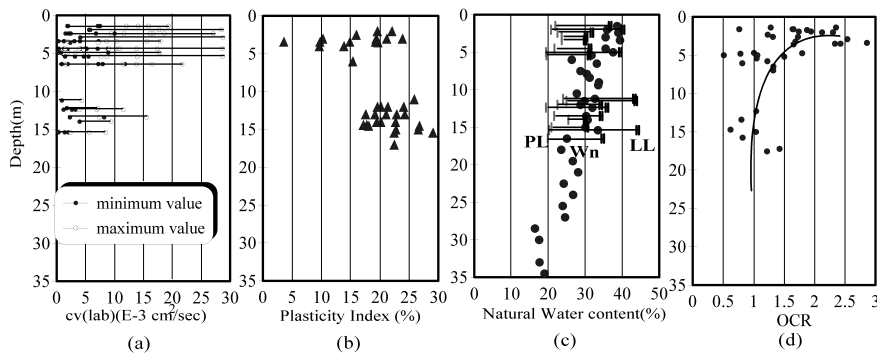
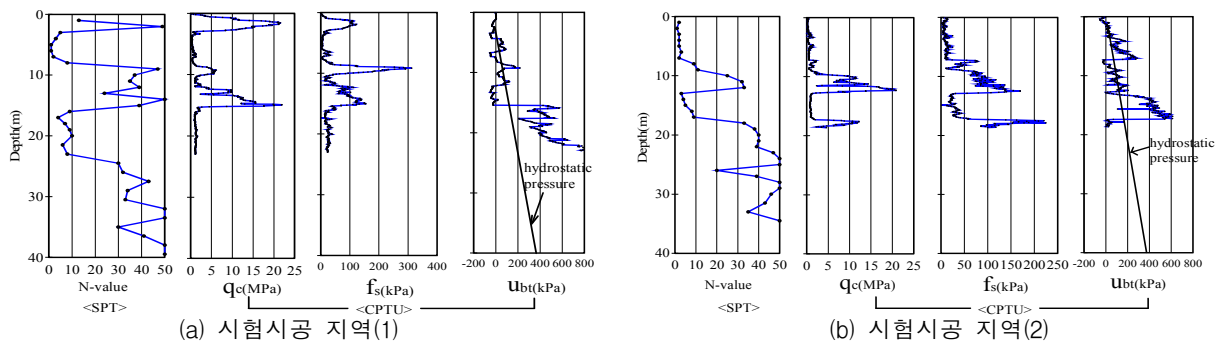
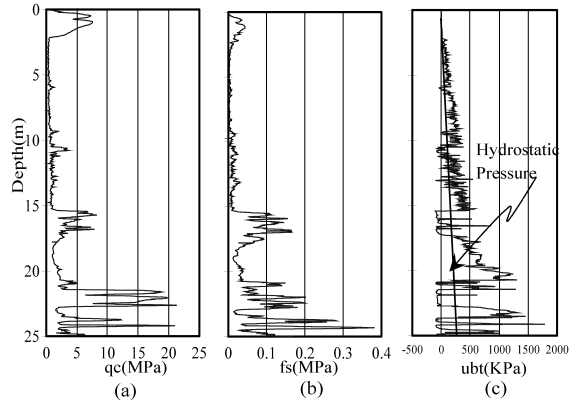


그림 1. 영종도 지역의 지반 정수 분포도 (김주형 등, 2000)





(c) 시험시공 지역(3)

그림 2. 영종도 지역의 대표적인 SPT와 CPTU 결과

영종도 지역에서 채취한 흙에 대한 소성지수 및 압밀특성은 이미 알려진 대로 상부퇴적층에 실트 성분이 많이 분포하여, 상대적으로 점토성분이 많이 포함된 하부 해성층에 비해 압축성이 작고 투수성이 크다. 또한, 그림 1(c)에서 보는 것처럼 상부 5m까지의 자연함수비는 액성한계와 비슷한 값을 가지며, 하부로 갈수록 함수비가 서서히 감소한다. 또한 그림 1(d)는 상부해성층의 과압밀비가 0.8~2.5 정도로서 조수간만의 차이에 의한 영향과 표층의 각질화로 인해 상부해성층이 약간 과압밀되어 있음을 보여주며, 하부해성층의 경우에는 정규압밀에 가까운 응력이력 상태를 나타내고 있다.

그림 2는 이 지역에서 실시한 표준관입시험 (SPT)과 콘관입시험 (CPTU)의 대표적인 결과를 나타낸 것이다. 그림 2에서 보면 상부에 약 6m~7m정도의 연약한 상부퇴적층이 존재하며, 상부퇴적층 하부에는 q_c 가 2MPa 이상이고 간극수압(u_{bt})이 정수압보다 작게 측정되는 충적층이 존재한다. 그 하부에는 다시 하부해성층과 잔류토가 존재하며, 해성점토층 사이사이에 실트·모래층이 끼어 있음을 보여준다.

문제는 상부해성층과 하부해성층 사이에 존재하는 단단한 층의 존재가 단순히 공학적으로 단단한 상부충적층으로만 평가되고, CPTU 시험 결과에서는 이 층에서 매우 큰 콘관입저항력을 가지며 정수압보다 작은 간극수압이 측정되어 단단한 모래층으로 구분된다는 것이다. 실제로 이 층에서 채취된 흙을 보면 황토색의 세립토와 자갈 및 모래가 섞여 있는 것을 확인할 수 있다. 실제로 유사현장에서는 일반적인 지반조사를 수행하여 상부충적층을 모래층으로 간주하여 설계를 하였지만 추후 확인 시추시 설계에는 반영되어 있지 않은 전혀 다른 단단한 점토층이 발견되어 설계변경에 어려운 경우도 발생하였다.



그림 3. 상부충적층 채취 시료

2.2 공학적/지질학적 관점

공학적인 관점에서의 지반조사 해석 결과는 지질학적인 분석 결과를 함께 고려하면 앞서 언급한 공학적인 한계성의 상당 부분을 해소할 수 있다. 지질학적 관점에서 영종도 지역의 지반특성을 분석하기

위해 사용한 조사방법은 앞서 공학적인 관점에서 수행한 시추공 조사와 압축과 전단과 같은 물리적 특성 분석을 위한 실내시험 외에도 직접 지층의 상태를 눈으로 확인하기 위한 전단면 트렌치 굴착, 일반적인 체분석을 통한 Textural composition, X-ray, Impregnation, lamina thickness and measurement을 통한 퇴적구조분석, Bulk chemistry, Elemental Chemistry, Isotopic Chemistry, Organic Carbon 측정을 통한 화학적 분석, smear-slide 방법을 이용한 2 μ m이하의 점토에 대한 성분 분석, Magnetic Susceptibility, 그리고 accelerator mass spectrometer(AMS)를 이용한 유기성분의 연대 측정을 통해 각 층을 구분하여 표 2와 같이 공학적인 층분류와 함께 나타내었다.

표 2. 영종도 지역의 공학적/지질학적 지층분류

Depth(m)	Soil Stratification with engineering view	Depth(m)	Soil Stratification with geological view
0	Upper Clayey Soil	0~6	I: Holocene tidal deposit
6	Upper Alluvial Soil	6~10	II: Weathered early Holocene non-marine mud IIIa: weathered late Pleistocene tidal deposit
10	Lower Clayey Soil	10~25	IIIb: Late Pleistocene tidal deposit Mud* Sandy silt to silty sand**
16	Lower Alluvial Soil		
25		25~35	IV, V: Late Pleistocene non-marine sand and mud
35	Weathered-Residual Soil	>35	Weathered residual soil

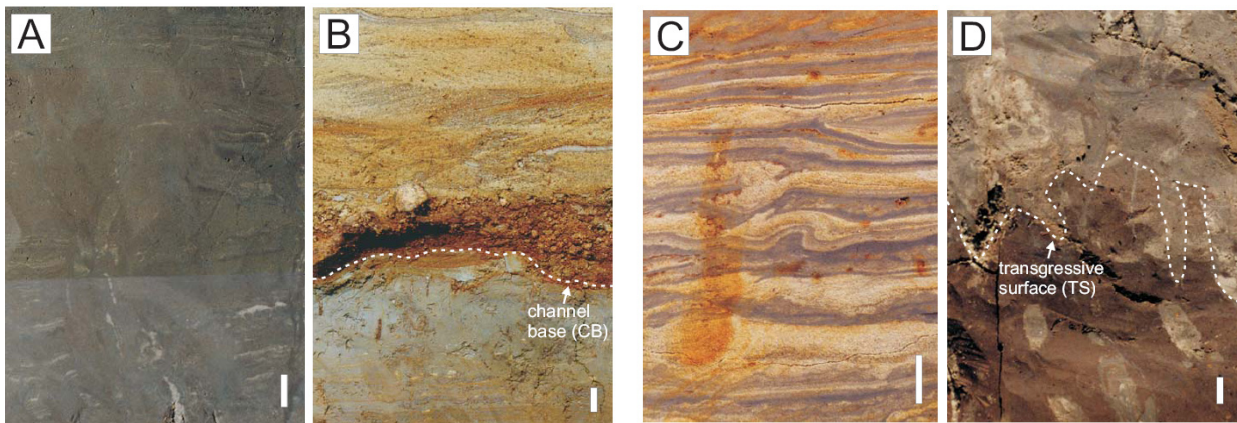
Unit I은 공학적인 지반조사 결과인 상부해성층과 일치하는 층으로 모래질 실트와 점토가 조류 영향으로 퇴적된 지층이다. 이 층은 non-cyclic lamination, herringbone cross-lamination, lenticular and wavy-bedding의 형태를 보인다 (Choi, 2001). 이 층에서는 간석지 사이에 발달하는 하도형태의 지형인 갯골(tidal channel)은 관측되지 않았다. 표준관입시험, 콘관입시험 및 현장배인시험 결과를 통해 공학적으로 분석한 상부 점토층은 최근에 퇴적된 연약 점토층으로 지질학적으로 잘 설명될 수 있다.

공학적으로 상부 층적층으로 분류된 지층은 지질학적으로는 초기 완신세 (Holocene)에 층적된 비해성 점토층인 Unit II와 말기 홍적세(Pleistocene)에 퇴적된 Unit IIIa가 혼재한다. Unit II는 완신세에 층적된 유기질 점토로 약 0~2.5m 두께로 쌓여 있으며, 지표로부터는 약 1.5~4m 심도에 존재하는 것으로 나타났다. 상부에는 pedogenically modified and weakly-developed clay illuviation and authigenic sphaerosiderites가 존재한다. 표준관입시험 결과 N값은 5~10 정도가 나타났으며, 콘관입저항력(q_c)의 경우 0.7~3MPa정도로 나타났다. 간극수압은 대부분 음의 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 이 층의 간극수압이 0 또는 음의 값을 나타내어 과압밀된 균열이 발달된 점토이며, 현장배인시험 결과는 40~70 kPa정도로 연약~중간정도의 균기를 갖는 점토인 것으로 나타났다. Unit II하부에 존재하는 Unit IIIa는 1~2m 두께의 후기 홍적세에 퇴적된 풍화토로 지표로부터는 약 2.5~6m 하부에 존재하고 있다. Unit IIIa는 황토 빛깔의 산화된 색을 가지는 흙과 illuvial clay coatings, 그리고 authigenic sphaerosiderites (Choi, 2001) 등 몇 가지로 구성되어 있다. 이 층은 과거 빙하기에 해수면이 낮아지면서 수면 위로 상승된 후 퇴적된 고토양 (paleosol)으로 육성층이다. 이 두 층이 일반적인 지반조사를 통해 종종 샌드심 또는 모래층으로 구분되는 층으로써, 표준관입시험 결과에서 채취된 교란시료에 황토색 세립토가 우세함에도 불구하고 자갈 또는 모래가 종종 섞여 나와 투수성이 매우 좋은 모래나 실트층으로 오인하는 경우가 많다. 그러나, 기존의 공학적인 지반조사 자료와 지질학적인 해석을 융합하여 판단한다면 이 두 층은 모래와 실트가 혼재하는 과압밀된 세립토층으로 평가하는 것이 바람직하다.

Unit IIIb는 후기 홍적세에 생성된 해성퇴적토로 공학적으로는 하부해성층에 해당하는 지층이다.

Unit IIIb는 썰물과 밀물이 반복되면서 곶이 생기는 갯골(tidal channel)과 조습지(tidal flat)로 구성되어 있다. Unit IIIb에 나타난 조습지 (Tidal flat)는 non-rhythmically laminated mud와 bioturbated mud로 구성되어 있다. 최대 두께는 약 9m 정도이며 지표에서 약 10.5~18.5 m 하부에 존재하고 있다. 이 조습지 면에서는 침식된 흔적이 보이며 N값은 4~30정도의 값을 나타내고 있다. 이 층의 콘관입저항력(q_t)은 매우 일정한 값을 보여 균질한 상태의 층을 나타내고 있다. 콘관입저항력은 0.5 - 1.8MPa이며, 측정된 관입간극수압은 양의 값을 나타내고 있어 대표적인 해성점토층의 특징을 나타내고 있다. 간극수압은 심도가 증가할 수록 선형으로 증가하며, 매우 균질한 점토층이 존재하고 있음을 확인하였다. 현장배인시험의 비배수전단강도는 40~70 kPa로 연약~굳은 점토의 강도를 갖는 것으로 나타났다.

갯골 (Tidal channel facies)은 2~6m 두께로 구성되어 있으며, 상부로 올라갈수록 세립분이 많이 존재한다. 갯골의 하부는 Cross-bedded silty sand, herringbone cross-bedded silty sand, and flaser-bedded silty sand 로 구성되어 있으며, 상부는 wavy bedded mud와 rhythmically laminated mud로 구성되어 있다. 콘관입시험 결과에서 보면 유로가 잘 발달되어 있는 층은 지표에서 10~16m 하부에 존재하고 있다. N값은 8~50정도이며 갯골 상부보다는 갯골 하부에서 큰 값을 나타낸다. 콘관입저항력은 1.5~20MPa로 매우 단단한 점토로 구성되어 있다. 조습지와는 달리 갯골에서는 콘관입저항력의 변화가 매우 심하며 음의 간극수압이 측정되는데 이는 이 지층이 heterolithic nature of deposits이라는 것을 말해주고 있다. 실제로 이 층에서는 모래와 점토가 교차로 퇴적되어 갯골을 구성하고 있는 것으로 나타났다. (Choi, 2001).



(a) Unit IIIb 조습지 (bioturbated mud)

(b) Unit IIIb 갯골

(c) Unit IIIb 조습지 (laminated mud)

(d) Unit II와 Unit I 접면

그림 4. 영종도 지층 단면 사진 (Choi and Kim, 2006)

Unit V는 주로 조립질 모래와 함께 약 5% 이내의 소량의 점토로 구성되어 있는 층이다. 이 층은 횡방향으로 일정하게 약 7m 두께로 구성되어 있다. 반면에 Unit IV는 횡방향으로 불연속적으로 존재하며 유기질토와 모래층이 교호하고 있다. 실제로 Unit IV에 유기질토가 존재함에도 불구하고 공학적으로는 표준관입시험 결과가 15~50/13cm인 매우 단단한 층으로 알려져 있다.

3. 요약

영종도 지역에 분포하는 지층은 다양한 원인으로 생성된 것으로 매우 복잡한 지층으로 구성되어 있다. 이와 같이 지질학적으로 복잡하게 구성되어 있는 지층을 공학적인 관점에서는 강도와 압축성에 국한하여 지반을 매우 단순화하여 해석하고 있는 것을 알 수 있다. 그림 5와 그림 6은 공학적인 면에서 본 영종도 지역의 지층단면을 나타낸 것이며 그림 6은 공학적인 자료와 지질학적인 자료를 함께 분석하

여 나타낸 영종도 지역의 지층단면이다. 이 두 그림에서 보면 상부와 하부에 존재하는 점토층은 공학적으로나 지질학적으로 유사한 결과를 나타내고 있으나, 상부충적층으로 알려진 Unit II와 Unit IIIa는 단단한 세립토층임에도 불구하고 공학적인 관점에서는 단단한 모래층이나 실트층으로 구분되는 오류가 발견되었다.

또한 하부해성층은 조습지와 같이 균질한 점토층으로 구성되어 있기도 하지만, 콘관입시험 결과에서 콘관입저항력의 변화가 심하고 관입간극수압이 정수압 아래의 값으로 떨어지는 모래와 점토가 교호하는 갯골이 존재하는 것을 또한 밝혀 낼 수 있었다.

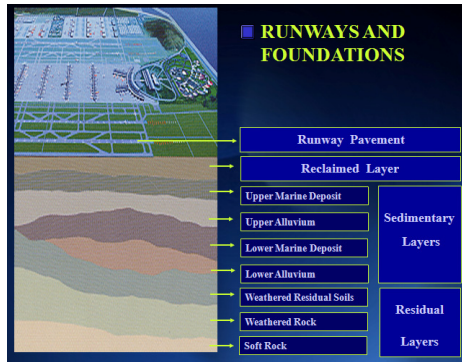


그림 5. 일반적인 영종도 지층 단면

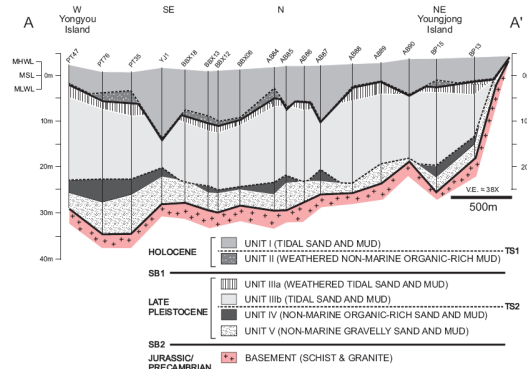


그림 6. 공학적/지질학적으로 평가한 영종도 지층단면 (Choi and Kim, 2006)

이와 같이 지반공학적인 지반조사 분석 결과와 함께 지질학적인 분석 결과를 융합하여 지반구조물 설계에 사용하는 지반설계 자료를 도출한다면, 매우 한정적인 지반 조사 결과만을 가지고 설계를 수행해야만 하는 설계자에게 상당한 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 영종도 이외의 지역에서도 지반공학적인 접근 뿐만 아니라 지질학적인 분석 결과를 함께 도입하여 설계에 반영한다면 지반구조물 설계 시에 설계자에게 매우 유용한 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김주형 김영웅 조성민 김명모 (2000), “인천국제공항 부지 해성 세립토에 대한 CPTU와 DMT 결과 비교”, 한국지반공학회 논문집 Vol.16, No.6, pp.23-33
2. Choi, K.S (2001), "Late Quaternary stratigraphy and evolution of tidal deposits in Kyunggi Bay, west coast of Korea", Ph.D thesis, Seoul National University, Seoul, Korea
3. Choi, K.S and Kim, J. H. (2006), "Identifying late Quaternary coastal deposits in Kyonggi Bay, Korea, by their geotechnical properties", Geo-Marine Letters, Springer-Verlag, Vol25, pp77-89