

지반개량 시험시공 사례

Case History of Soil Improvement for Pilot Test

나영목¹⁾, Yung-Mook Na, 홍의²⁾, Eui Hong, 이영남³⁾, Young-Nam Lee, 이만수⁴⁾, Man-Su Lee,

- 1) 현대건설(주) 창이매립현장 과장, Senior Geotechnical Engineer, Reclamation at Changi East Ph-1B Hyundai Engineering & Construction Co., Ltd.(HDEC)
- 2) 현대건설(주) 창이매립현장 대리, Geotechnical Engineer Reclamation at Changi East Ph-1B(HDEC)
- 3) 현대건설(주) 기술연구소 수석 연구원, Senior Researcher in Chief, Hyundai Institute of Construction Technology
- 4) 현대건설(주) 기술연구소 연구원, Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology

개요(SYNOPSIS) : This project covers the areas required for the future Runway 3 of Changi Airport and associated taxiways. Substantial soil improvement works are involved as the runway is underlain by deep deposits of soft compressible marine clays. To avoid surface settlement and future runway maintenance problems it is intended to improve the compressible soils by installing vertical drains and surcharging to accelerate the consolidation process, and to improve sand fills by dynamic compaction or an equivalent. This paper presents typical results and our observation from the pilot test associated with the soil improvement, which was carried out before main works.

주요어(Key words) : Soil Improvement, Reclamation, Sand Fills, MRC,

1. 서론

도시국가인 싱가포르에서는 1964년 이후 대규모 매립공사를 계속적으로 수행하여 현재에는 전국토의 15%가 매립으로 확보 되었고 이러한 매립지역은 주택단지, 항만시설 및 공항부지 등으로 사용하고 있다. 세계적으로 유명한 창이 공항의 제 1, 2 활주로 역시 매립한 지역에 건설 되었다.

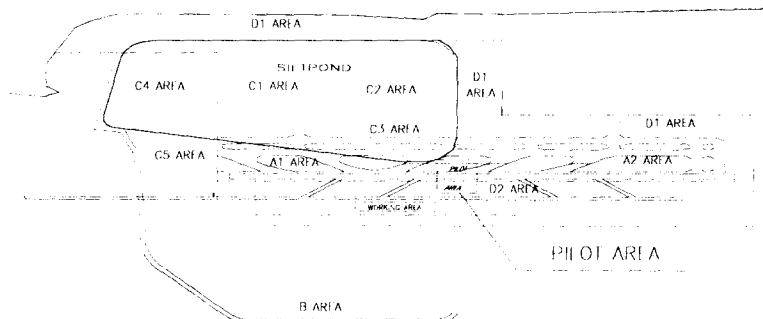


그림 1. Site plan showing reclamation site

본 공사(그림 1 참조)는 창이 공항 제 3 활주로를 건설할 목적으로 싱가포르 동부해안에 540ha 면적을 매립하여 그 지반을 개량하는 공사로서 1993년 3월 현대건설에 의해 시작되어 현재 90%의 공정이 완료된 상태이다. 이 지역은 평균 해수면이 (+)2.5 mACD이고, 평균 해저면은 (-)4.0 mACD이며, 10~30m의 해성 점토가 산재하는 지역으로 큰 압밀이 예상되어 압밀침하

를 단기에 완료시켜 시공후의 잔류침하를 최소화하고 지반의 강도를 증가시키기 위해 수직 드레인을 병행한 선행 재하공법(Preloading with Prefabricated Vertical Drains)을 사용하였다. 또한 준설매립토의 지반개량을 위해 MRC (Muller Resonant Method) 공법을 채택하였다.

본 공사에 앞서 수직 드레인의 성능 및 타입기의 적합성을 판단하고자 시험시공을 하였고, 그 크기는 길이 280m과 폭 230m이었다. 시험시공구간은 50m×50m의 4개의 작은 구간(Lot)으로 나누어져 있다. 이 4개의 Lot중 3곳은 각기 다른 간격으로 수직 드레인이 타입되었고, 나머지 1개의 지역은 기준지역으로 수직 드레인이 타입되지 않았다. 각 Lot에는 그림 2의 단면 A-A에서 볼 수 있는 바와 같이 각종 지반 계측기를 설치 하여 모래 余成 후 드레인의 간격에 따른 지반의 거동을 면밀히 측정할 수 있도록 하였다.

시험구간의 지반조사 결과에 의하면, 전형적인 지층구조는 두께가 약 5m 정도인 상부 해성점토층, 약 5m에서 10m정도의 조밀한 모래 층이 하나 또는 두 층이 중간에 존재하고 그 아래에는 약 20m 두께의 하부 해성점토가 조밀한 모래층 위에 분포하고 있다. Pilot 지역의 전형적인 지반조건을 나타내는 지층 단면이 그림 2의 단면 A-A에 도시되어 있다.

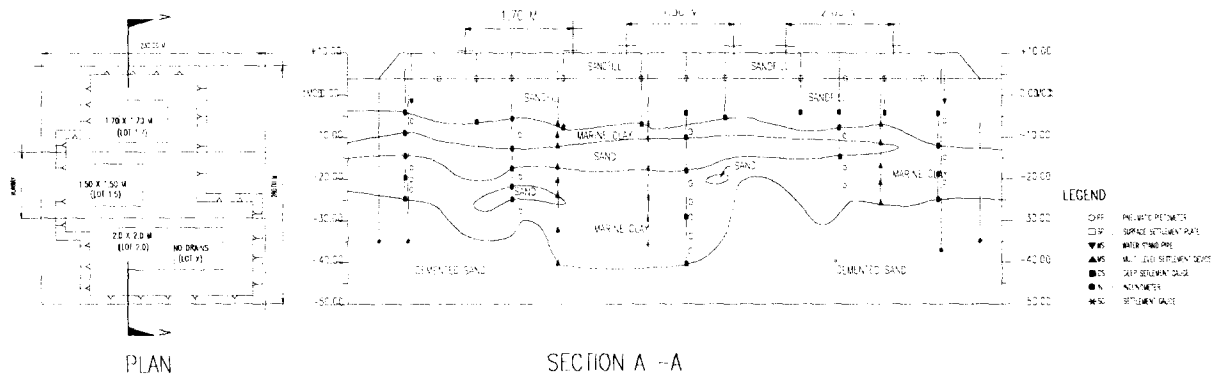


그림 2. Plan of PILOT AREA

당현에서 시행한 시험시공의 주요한 순서는 다음과 같다.

- 1) 본 공사 수행 전에 해상조건에서 지반조사 및 계측기를 설치한다.
- 2) Pilot Area를 (+)4.0 mACD까지 매립한후 육상조건에서 상세 지반조사 실시한다.
- 3) 수직 드레인을 각각 서로 다른 간격으로 타설하고 그 전후에 계측기를 설치한다.
- 4) 펌프 준설선을 이용하여 +10.0 mACD까지 여성토하여 18개월 지속한다.
- 5) 연약한 지층(점토층)의 개량 여부를 판단하기 위한 확인지반조사를 실시한다.
- 6) 연약한 지층이 소정의 개량이 이루어진 경우에 여성토를 제거한다.
- 7) 상부에 매립된 토사를 다짐한다.

본 원고에서는 시험시공구간에서 지반개량작업, 계측작업, 계측결과를 이용한 여성토 제거시기 결정 그리고 지반개량 효과에 대한 평가를 중심으로 필자가 현장에서 경험한 사항을 보고하고자 한다.

2. 지반조사

2.1 지반조사

현장의 지층구성에 대한 토질역학적인 정보와 원지반의 제반 성질들을 파악하기위하여 매립 전과 직후에 지반조사를 실시하였으며, 지반개량 중과 후에 동일한 위치에서 이를 다시 실시하여 지반개량 정도를 평가하였다. 지반조사는 잭업 폰툰(Jack-up pontoon)을 이용한 해상작업과 매립후의 육상작업으로 구분하여 수행하였다. 지반조사시 점토구간은 1m 간격으로 시료를 연속하여 채취하였다. 피스톤 샘플러는 통상 비배수전단강도, 즉 $C_u=60kPa$ 까지 사용 가능하였으며, 셀비 튜브는 $C_u=100kPa$ 이하까지

시료채취가 가능하였다. 이때 모래층이나 견고한 점토를 만나게 되면 표준관입시험을 1m 간격으로 실시하였다. 배인 전단시험은 점토구간에서 1m 간격으로 실시하였으며 통상 $C_u=90kPa$ 까지 실시 가능하였다. 배인전단시험과 보링조사는 1.5m~2.0m 떨어진 위치에서 수행되었으며, 보링조사에서 채취된 자연시료는 일반 물성치시험, 강도시험 및 압밀시험을 현장실내시험실에서 수행하였다. 현장의 원위치 시험은 배인전단시험, 콘관입시험, SBPT(Self Boring Pressuremeter)와 DMT(Dilatometer) 등이 수행되었다.

2.2 지층구조

매립 이전에 수행된 지반조사에 의하면 고결된 실트-점토질 모래로 이루어진 오래된 충적층(Old Alluvium)이 하부에 분포하고 있고, 이 층 위에는 연약-중간 실트질 점토로 이루어진 Kallang Formation과 강과 바다가 기원인 홍적세 후기와 신생대에 이루어진 모래 층이 분포하고 있다. 해성점토의 성질은 현장의 북쪽과 남쪽 부분의 성질이 서로 다른 것으로 나타나고 있고, 그 경계선은 Lot 2.0 과 Lot 1.5를 북서쪽에서 남동쪽으로 관통하는 것으로 나타났다.

2.3 해성점토의 지반공학적 성질

시험시공구간에서의 해성점토는 보링조사와 실내시험 결과에 의해 1)상부 해성점토(Upper marine CLAY), 2)하부 해성점토의 상부층(Upper layer of lower marine CLAY), 3)하부 해성점토의 하부층(Lower layer of lower marine CLAY)으로 구분할 수 있었다.

이러한 해성점토층의 두께는 위치마다 각기 서로 다른데, 일반적으로 상부 해성점토는 해저면 아래 0.0m~5.5m까지 분포하였다. 하부 해성점토의 상부와 하부층은 대략 해저면 아래 6.0m~19.0m와 11.0m~33.0m에 분포하고 있음을 보였다.

상부 해성점토의 자연 함수비는 64%~86%이고, 습윤 단위중량은 $1.34\sim1.59Mg/m^3$ 의 범위이다. 소성지수는 A-line 위에 위치하고 그 범위는 49~67이었다. 따라서 상부 해성점토는 고소성을 갖는 점토로 분류된다. 과압밀비가 1.9~8.4이므로 과압밀 점토로 분류되고, 시험결과 선행압밀응력은 $25\sim67kN/m^2$ 이었다. 실내시험 결과 전단강도는 매우 연약한 점토의 특성을 보였다.

하부 해성점토의 상부층의 자연 함수비는 51%~66%이고, 습윤 단위중량은 $1.58\sim1.69Mg/m^3$ 와 45~65의 소성지수를 보였다. 이 층에서 선행압밀응력은 $45\sim200kN/m^2$ 의 범위로써 정규압밀내지 약간 과압밀된 지층으로 분류될 수 있다. 전반적으로 이 층은 전단강도가 연약에서 보통(soft to firm) 점토로 거동하며, 곳에 따라 모래질 점토, 유기질 점토와 모래 층이 협재하고 있다.

하부 해성점토의 하부층의 자연 함수비는 42%~55%이고, 습윤 단위중량은 $1.83Mg/m^3$ 으로 상당히 높고 소성지수는 중간에서 고소성의 범위를 보였다. 선행압밀응력은 $180\sim266kN/m^2$ 의 범위를 나타냈고, 과압밀 점토로 분류되며 전단강도는 보통에서 단단한(firm to stiff) 점토의 성질을 보이고 있다.

극히 일부구간에서 가끔 표준압밀시험 결과의 과압밀비가 1보다 작은 경우 즉 압밀 진행중인 경우도 있었다. 이러한 현상은 아마도 자연적인 영향과 실트질, 모래질, 조개껍질류와 이탄질 흙의 조성에 기인한 것으로 생각된다. 일반적으로 이러한 지층은 그 구성이 주로 식물의 줄기, 뿌리, 나뭇잎 줄기, 초목류 같은 형태와 습한 상태에서의 다양한 분해단계에 있는 유기물의 흔적을 포함하고 있다. 이러한 물질들의 존재의 표시는 퇴적의 단절과 혐기성 환경에서 이루어졌다는 것을 분명히 표현해 주고 있다.

3. 연약지반 처리

3.1 매립

매립재는 현장에서 27Km 떨어진 인도네시아 Batam 섬 근해에서 채취한 깨끗한 세립에서 중간 모래를 이용하였다. 매립하는 동안에 일정한 빈도로 토출지점과 준설선에서 매립재를 채취하여, 입도분석을

하였으며, 전형적인 입도 분포곡선은 그림 3에 나타난 바와 같다. 매립 및 여성도는 매립지에서 3Km 떨어진 펌프 준설선에서 해상관을 통하여 Hydraulic Filling 방법으로 수행하였다. Hydraulic Filling시 토출구 전면에 형성되는 매립토의 표면 경사는 일반적으로 토출 방법 및 토출되는 입도의 크기에 좌우되며, 필자의 현장에서 해수면위는 1V:20H 정도 이었고 해수면 아래는 1V:3H 정도가 측정되었다.

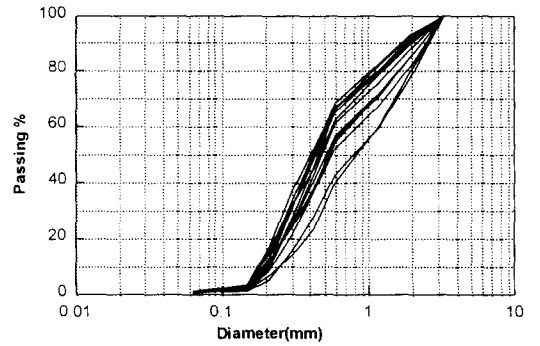


그림 3 전형적인 입도분포곡선

3.2 지반개량

3.2.1 연약한 압축성 해성점토층의 지반개량

본 공사에서는 연약한 압축성 해성점토층의 지반개량공법으로 수직 드레인과 여성토에 의한 방법을 채택하였다. 수직 드레인은 통상 지반조건에 따라 타설방법을 달리하며 그 지반조건에 가장 적합하고 경제적인 방법으로 선택되어진다. 타설방법은 표 1에서 보여주듯이 1)정적 방법 2)동적 방법 3)동적을 겸한 정적 방법 4)Pre-Drilling 방법 등으로 구별할 수 있다.

표 1. 수직 드레인의 타설방법

구 분	수직 드레인의 타설방법			
	정적(static force)	동적(vibratory force)	정적+동적	Pre-drilling
장비 본체	백호우 25~60ton	크레인 Crawler crane	크레인	드릴링 장비
최대 심도	35m	20m	50m 이상	
평균 타설량(m/10hr)	5000~6000	3000~4000	6000~8000	대단히 느림 500~1500
관입할 수 있는 중간토층	10m 이내의 매립층	단단한 매립층	N<30	N>50

수직 드레인은 드레인 설치기의 맨드렐(Mandrel) 내에 설치되는데, 그 끝은 맨드렐 하부에서 흙이 맨드렐 내부로 침입하는 것을 방지하고 수직 드레인을 단단한 지반에 고정하기 위해서 직경이 12mm 이고 길이가 15cm인 철근을 anchor bar로 부착하였다. 수직 드레인은 (+)4.0mACD에서 수직 드레인을 내재하고 있는 맨드렐이 소정의 단단한 지층의 0.5~1.0m까지 압입되고 나면 맨드렐을 회수하게 되는데 이 때 수직 드레인은 anchor bar에 의해 지중에 매설되며 지표면으로부터 100mm 길이 정도 남겨둔채 설치를 완료한다. 맨드렐 회수 중에 지반내의 과잉간극수압과 맨드렐내의 대기압차로인하여 깨끗한 굵은 모래나 대단히 연약한 점토가 맨드렐 하부로 침입하여 수직 드레인이 절단되는 사례가 있었으나 맨드렐 내에 물을 계속 주입하여 수두를 높여줌으로써 이를 해결하였다. 시험시공 일부구간에서는 원지반 상부층이 대단히 고결(N>50) 하여 Pre-Drilling후 수직드레인을 타설하였으나 소규모인 경우를 제외하고는 경제성이 없는 것으로 판단된다.

시험시공에서는 폭이 약 100mm인 Colbond CX 1000의 기성제품인 밴드(band) 형태인 드레인을 그림 2에 도시되어 있는 바와 같이 1.5m×1.5m, 1.7m×1.7m와 2.0m×2.0m 간격으로 설치하고, 나머지 1개 구역은 수직 드레인을 타설하지 않는 기준지역(control area)으로 남겨두었다.

3.2.2 준설 매립된 모래층의 지반개량

펌프 준설선에 의해 매립된 모래를 개량하기 위해서는 시방서에 동다짐(dynamic compaction)이나 그에 상응하는 다른 방법을 이용하여야 한다고 규정하였다. 다짐이 끝난 후의 다짐정도의 평가는 콘관입 시험에 의해서 판단되는데 최소한의 콘관입 저항값(q_c)이 활주로에 대해서는 15MPa, 유도로는 12MPa

이상으로 규정되어 있다. 본 공사의 준설 매립된 모래층의 지반개량 방법은 여러 가지의 다른 공법을 검토한 후에 MRC(Muller resonance compaction)를 채택하였는데 그 개념은 다음과 같다. 지층이 공진 주파수(resonance frequency)에서 가진되었을 때 진동증폭 효과가 발생하고 가진하중에 의해 침하량을 과다하게 발생시켜 지반을 개량한다는 것이다.(Massarsch, 1991). 큰 충격 에너지로 동다짐을 하거나 바이브로 윙(Vibro Wing)으로 deep compaction을 하는 경우 표면에서의 다짐정도가 불충분하여 ironing pass 같은 표면다짐이 수반되어야 한다. 특히 Vibro Wing을 CPT의 friction ratio가 1보다 큰 토질에 사용하는 경우에는 그 효과가 저조 하였다. 그림 4에는 시험시공 구간에서 MRC 방법으로 다짐하기 전과 후의 콘관입 시험결과가 도시되어 있다. 다짐 후 매립토의 침하량은 다짐두께의 약 8% 정도로 계측되었다(콘관입 저항(q_c)>15MPa).

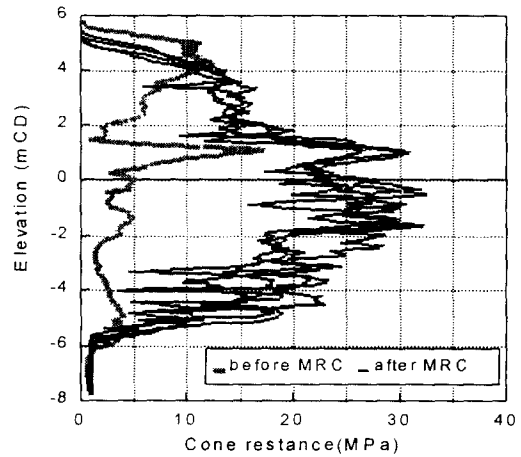


그림 4. 다짐 전후의 콘 관입 시험결과

3.3 지반계측

3.3.1 매설된 계측기

시험시공 지역에서는 다음과 같은 목적으로 여러 종류의 계측기를 설치하였다.

- 1) 규정된 드레인 간격과 여성토 하중하에서 하부지반의 거동을 계측하기 위해
- 2) 안정성 유지를 위한 매립성토의 속도를 제어하기 위해
- 3) 매립지반의 침하예측과 여성토 제거시기의 결정을 위해서이다.

매립전에 드레인을 타설하지 않는 구역(Lot X) 중앙에 H-Beam으로 해상 프로텍션 플랫폼을 설치하여 그 위에서 각종 계측기를 설치하였다. 해상 프로텍션 플랫폼을 설치함으로써 매립작업 전과 진행중일 때 매설된 계측기들에 대한 접근과 계측을 용이하게 하여 매립 진행중에 지반의 거동을 계측할 수 있었다. 그외 대부분의 계측기들은 수직 드레인의 타입 전 후에 설치되었다. 시험시공 구간에 매설된 계측기는 크게 1)경사관련 계측기, 2)침하관련 계측기, 3)간극수압관련 계측기, 4)지중응력계로 대별할 수 있다. 이 중 침하관련 계측기는 측량에 의해 계측되는 지표면 침하계, 층별 침하계, Deep Reference Point 와 계측장비를 이용하는 Magnetic Extensometer, V.S. Liquid Settlement 등을 설치하였다. 간극수압관련 계측기는 Pneumatic Piezometer, Open type Piezometer, Water Stand Pipe 및 V.S. Piezometer 등을 설치 운용하였다.

튜브안으로 질소개스를 흐르게 하여 계측하는 Pneumatic Piezometer의 경우는 여성토 후 2~3개월 내에 전체의 50%정도가 파손되어 설치방법을 보완 재설치하였다. 이러한 Pneumatic Piezometer의 파손 원인은 Hydraulic Filling 방법으로 여성을 하는 동안 연약한 점토층의 과대한 압밀침하와 수평변위가 동시에 발생함으로 인하여 튜브가 헐착되어 발생한 것으로 판단된다. 이에따라 현장에서는 1인치 스틸 파이프속에 튜브를 넣고 트랜스듀서는 모래주머니로 감싼 후 3인치 스틸 파이프로 보호할 수 있는 보호구를 고안하여 설치방법을 보완하였으며, 그 결과 매우 양호한 잔존율을 얻을 수 있었다. 이러한 경험으로 볼 때 상당한 압밀침하 및 수평변위가 예상되는 연약한 점토지반에서는 일반적인 방법을 이용한 Pneumatic Piezometer의 설치하는 좋은 계측결과를 얻기에 부적합하며, 현장 지층조건에 적합한 설치방법이 요구된다.

3.3.2 계측결과

계측기를 설치한 후의 계측빈도는 계측기의 종류, 설치시기, 공사시기 등에 따라 정기적으로 실시하였는데 특별한 경우에는 같은 기간중에 빈도를 높였다. 통상 여성토를 쌓는 기간동안 거의 매일 한 번씩 계측을 실시하였으며 여성이 완료된 직후부터는 계측빈도를 줄여 나갔다. 그림 5는 Lot 1.5 의 침하결과를 보여주고 있다.

4. 압밀도 평가 및 여성토의 제거

압밀도를 평가하는 방법은 계측된 침하곡선과 간극수압의 소산정도를 이용하는 방법과 현장시험을 통한 강도의 증가로 평가하는 방법 그리고 실내시험에서 압밀시험결과를 이용하는 방법등이 있다.

여성토의 제거시기는 압축성이 큰 연약한 해성점토에 대한 시방조건이 최근에 매립된 토사 및 여성토에 의한 하중증가에 대해서 최소한 일차 압밀의 90% 이상인 시점으로 규정하고 있다. 따라서 압밀도를 산정하기 위해서 두 가지 서로 다른 해석방법인 쌍곡선 법(Tan, 1971)과 Asaoka 법(Asaoka, 1978)이 사용되었다. 두 가지 해석방법은 모두 커브피팅(Curve Fitting) 방법으로서 여성기간 동안 실측된 침하량을 이용하여 최종 침하량과 침하속도를 산정할 수 있다. 이러한 커브피팅 방법은 여성토 제거 직전에 수행하였으며 여성 직후 실내시험 결과를 토대로 "CONSOL" 프로그램을 사용하여 구한 최종 침하량과 비교하였다(표 2). 표 2에서 보여주듯이 드레인 타설지역인 Lot 1.5, Lot 1.7 Lot 2.0 에서의 압밀도는 Asaoka 방법에 의하면 거의 100%, 쌍곡선방법에 의해서는 85%~90% 정도로 평가 되어, Asaoka 방법으로 압밀도를 해석한 결과는 "CONSOL"에서 구한 압밀도값과 거의 일치하였으나 쌍곡선법으로 구한 값보다는 약 10% 정도 크게 평가되었다. 이 이유는 이론적으로 쌍곡선법은 시간이 무한대에서의 최종침하량이므로 여기에는 이차 압밀이 포함되어 있기 때문인것으로 판단된다.

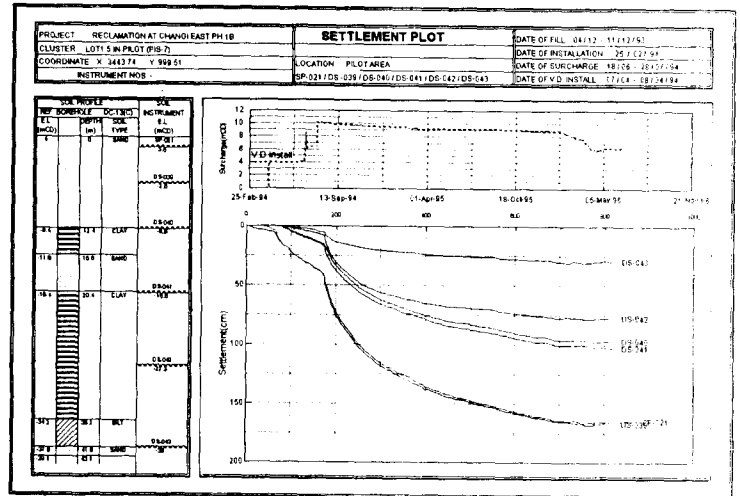


그림 5 압밀침하곡선

표 2. 시험시공 지역의 역해석 결과

Description		S=1.5m	S=1.7m	S=2.0m	No drain	
1.	Thickness of clay(m)	24.7	17.7	11.5	25.0	
2.	Coefficient of consolidation(m ² /yr)	Cv(from lab)				
		1.0	1.0	1.5	1.3	
3.	Ultimate settlement(cm)	CONSOL	164	176	62	227
		Asaoka	163.5	174.3	60.4	83.4
		Hyperbolic	190.9	196.8	67.1	94.2
4.	Date of analysis	20-Dec-95				
5.	Elapse time from surcharge(day)	511	538	510	520	
6.	Settlement to date(cm)	163.5	177.4	59.9	76	
7.	Degree of consolidation to date(%)	CONSOL	99.7	100.8	96.6	33.5
		Asaoka	100.0	101.8	99.2	91.1
		Hyperbolic	85.6	90.1	89.3	80.7
		Piezometer	79.2	-	-	37.5
8.	Consolidation for 500 days after surcharge under no drain installed	U(%)	48	64	71	27
		(cm)	79	113	44	60

Remark : * 일차압밀 침하량

그러나 Asaoka 방법으로 압밀도가 90%에 도달되었다고 해석되는 시점에서 여전히 상당한 압밀침하(3~4cm/월)가 발생하는 사례가 빈번하게 계속되었다. 따라서 여성토 제거시기 결정은 장래 그 부지의 사용목적에 따른 허용 침하량과 관련하여 적합한 예측방법을 선택하여야 할 것으로 판단된다.

드레인이 타설되지 않은 Lot X 는 “CONSOL”로 구한 압밀도가 33.5% 인 반면 커브피팅 방법으로 구한 압밀도는 80%이상으로 평가 되었는데, 이것은 침하 초기에 실측된 자료를 이용하여 커브피팅 방법으로 구한 최종 침하량이 과소 평가되고 있음을 보여준다.

시험시공구간은 현장의 종류의 지층구조가 교차하는 곳으로 각각의 Lot의 지반성질이 판이 하였다. 그러므로 일반적인 방법으로 드레인 간격에 따른 압밀속도를 판정하는 것은 쉽지않으나 그림 6에서와 같이 모든 Lot에 드레인이 타입되지 않았다고 가정했을 때 500일 후의 압밀도를 구하여 드레인 간격에 따른 실제의 압밀도와 비교한 결과 드레인 간격이 가까울수록 압밀속도가 빠름을 알수 있었다.

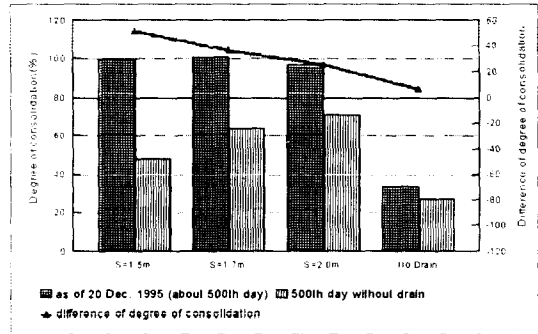


그림 6. 드레인 간격에 따른 압밀속도 평가

5. 지반개량 효과의 평가

5.1 현장 지반조사 및 시험

서로 다른 간격의 드레인 설치 구간에서 달성한 지반개량의 정도를 평가하고 지반개량이 이루어지는 동안에 토성의 변화를 관찰하기 위해서 원위치 시험과 실내시험이 병행되었다. 여성토의 제거 이전에 5개월 동안 보링조사, 배인전단시험 그리고 간극수압 소산시험을 병행한 피에조콘 관입시험등이 수행되었다. 콘관입시험중 4개소 Lot 1.5, Lot 1.7, Lot 2.0과 Lot X에서 기설치된 피에조메토가 정상적으로 작동하는지를 판단하기 위해서 여러 깊이에서 간극수압 소산시험(CPT holding test)들을 수행하였으며 그 결과를 그림 7에 표시되어 있다. 각 시험은 1 개소에서 대략 30시간 동안 지속되었다.

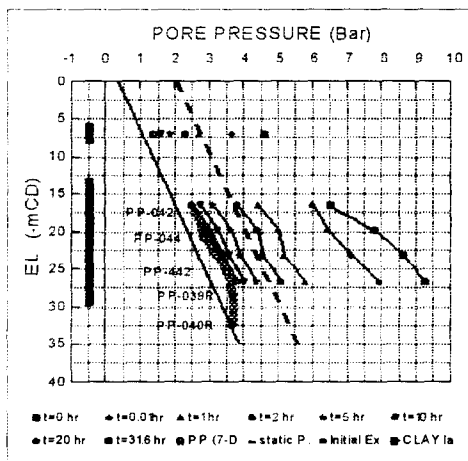


그림 7. 간극수압 소산시험

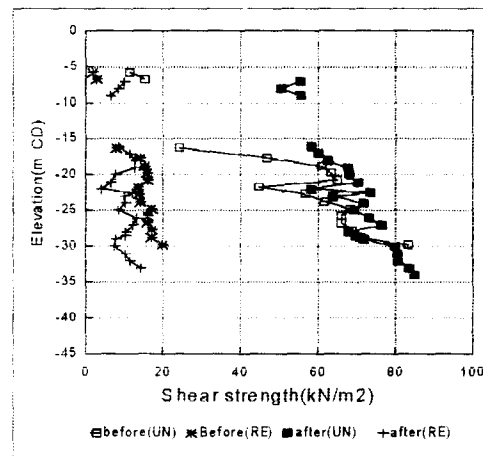


그림 8. Field vane shear test

그림 8에 Lot1.5에서 연약지반 개량 전후에 실시한 배인 전단시험의 결과를 보여준다. 여기에서 드레인이 타설된 지역 상부 대단히 연약한 점토에서는 비배수 전단강도의 증가폭이 두드러진 반면에 하부 단단한 점토층에서는 그 증가폭이 크게 감소함을 보여주고 있다. 이것은 하부 단단한 점토층에서 지반 개량 전에 비교적 큰 과압밀응력을 갖고 있었기 때문인 것으로 판단된다.

5.2 실내시험

지반개량 전과 후에 보링조사에서 채취된 자연시료를 이용하여 기본 물성시험, 압축특성 및 전단강도에 대한 시험을 수행하였다. 그 결과 깊이에 따른 각각의 지층에서 지반개량효과를 확인할 수 있었으며,

특히 상부 해성점토층에서 그 정도가 탁월 하였다. 지반개량후 상부 점토층의 자연함수비는 53-67%, 습윤단위중량은 1.61-1.7 t/m³, 선행압밀응력은 95-163kN/m², 배인전단강도는 40kPa 이상 이었다.

6. 결론

본 공사에 앞서 드레인 간격 및 타입기 그리고 매립재의 다짐방법등 에 대한 현장 적합성을 판단하고자 시험시공을 실시하였다.

이 시험시공을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 드레인 타입시 드레인재가 절단되는 사례가 있었으나, 이를 해결하는 방법은 드레인재의 인장강도를 증가시킬수도 있으나, 맨드렐내부에 물을 주입하는것과 같은 시공방법의 개선을 통하여 해결할 수 있었다.
- 2) 양질의 사질토 매립재에 대한 다짐방법으로 MRC가 적용될 수 있었고, 콘저항값이 15MPa 이상을 요하는 다짐구간에서의 침하량은 다짐깊이의 8% 정도 였다.
- 3) 상당한 압밀침하와 수평변위가 발생하는 지역에서는 일반적인 Pneumatic Piezometer의 설치방법은 좋은 계측결과를 얻기에 부적합하며, 현장조건에 적합한 설치방법이 요구 되었다.
- 4) 연약지반개량공법으로 채택한 수직 드레인을 병행한 선재하공법은 본현장에 적합한 방법이었음이 확인 되었으며, 드레인의 간격이 가까울수록 압밀속도가 빨랐다.
- 5) 수직 드레인공법이 강도증가에 미치는 효과는 연약한 상부점토층에서 탁월 하였으나, 과압밀된 하부 점토층에서는 그 효과가 크지 않았다.
- 6) 압밀도를 판정할 수 있는 방법은 여러 가지가 있으나 그 중에서 실측된 침하량을 이용하는 커브피팅 방법이 가장 신뢰성이 있는 것으로 판단되나, 이는 반드시 실내시험결과를 근거한 이론해석과 병행 되어야 한다.
- 7) 여성토 제거시기 결정은 장래 부지사용목적에 따라 커브피팅방법중 적합한 방법을 선택하여 사용 하여야할 것으로 사료 되었다.

감사의 글

본 현장 공사수행에 많은 기술적 지도와 격려를 아끼지 않았던 싱가포르 난양대학의 Victor Choa교수님께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 계측 및 조사업무를 성실히 수행 하여준 동아건설턴트 직원들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. Asaoka, A.(1978), "Observational procedure of settlement prediction", *Soils and Foundations*, No. 4.
2. Choa, V.(1995), "Soil improvement works in major reclamation projects", Bengt B. Broms *Symposium on Geotechnical Engineering*, Singapore, 13-15 December 1995, pp. 57-77.
3. Massarsch, K. R. and Heppel, G.(1991), "Resonance compaction for granular soils", *Southeast Asia Building Journal*, Dec. pp 36~40.
4. Tan, S. B.(1971), "An empirical method of estimating secondary and total settlement", *Proceedings of 4th ACSMFE*, Bangkok, Vol. 2, pp 147~151.