

기술기사

인천국제공항 연약지반개량 시험시공 결과 및 적용

Test embankment results and its applications
to the ground improvement at Incheon International Airport

박기순*1, 김학중*2, 김성수*3

1. 서론

21세기에는 동북아를 포함한 환태평양 경제권의 발전과 경제 Global화의 급진전으로 지속적인 항공교통 수요의 증대가 예상되고 산업구조의 고도화에 따른 고부가가치 상품의 교역과 서비스 산업의 확대에 항공교통이 주요교통수단이 됨으로 인하여 급증하는 항공수요 처리능력이 한계에 달한 김포공항을 대신할 신공항 건설의 시급성이 대두 되었다.

이에 따라 정부는 수요의 주 발생지인 수도권과 1시간 이내에 위치하고 항공기 이·착륙시 소음피해가 거의 없으며, 광활한 부지를 확보할 수 있는 유리한 입지를 갖춘 영종도 및 용유도 일대를 인천국제공항(신공항) 건설 부지로 선정하였다.

영종, 용유 일대의 간석지 위에 평균 5m 두께로 매립하여 부지를 조성한 인천국제공항은 지반조사 결과 해성점토층으로 이루어진 연약지반이 최대 GL-11.5m(평균 5.0m)두께로 분포되어 있으며, 예상침하량은 평균 50cm로 연약지반을 개량하고자 경제성, 기술수준, 환경오염성 등을 고려하여 물리적 개량공법인 수직배수재공법으로 설계하였다. 수직배수재공법은 공학적으로 타당성 있는 이론에 근거하였으나 실제로 시험현장에서 관측되는 지반의 거동은 설계시 예상

한 바와 상이하므로 이러한 이론과 설계의 차이를 극복할 수 있는 가장 바람직한 방법중의 하나로써 시험시공을 채택하였다. 본 시험시공으로부터 지반특성에 적합한 공법을 선정하고 장래 예상되는 문제점을 사전에 파악하여 이에 대비할 수 있는 방안을 제시하고, 품질제고를 위한 기술시방서를 보완함으로써 본 공사의 품질관리 및 경제성 향상에 기여코자 한다.

2. 시험시공 계획

시험시공은 신뢰도 및 경제성 측면에서 다음 두가지 사항을 고려하는데 신뢰도 측면에서는 가능한한 실제 구조물과 동일한 규모가 되도록 하여야 하고, 경제적 측면에서는 가능한 한 최소규모로 선정하여야 한다. 위 사항을 고려하여 시험시공을 2구간으로 구분하였으며 먼저 수직배수재가 타설되는 구간의 시험시공 규모는 성토부 상단폭 84m, 상단길이 360m로서 이를 4등분하여 84m×90m 지역에 각각 다른 종류의 수직배수재를 타설하는 지반개량공법을 적용하여 그림1과 같이 계획 하였으며, 또한 Sand Mat의 배수효과를 분석하기 위해 수직배수재가 타설되지 않는 단순 선행 재하공법구간의 규모는 원지반 상부에 양질의 준설패립재료(#200체 < 5%)를 포설한 지역(Sand Mat)과 세립분이 상대적으로 많은(분공사구간과 동일한) 준설패립재료를 포설한 지역(Sand Mat)으로 구분하여 84m×180m로 시공하도록 계획하였다.

*1 비회원, 신공항건설공단 건설시험소 과장

*2 정회원, 신공항건설공단 건설시험소 과장

*3 비회원, 신공항건설공단 건설시험소 사원

기술기사

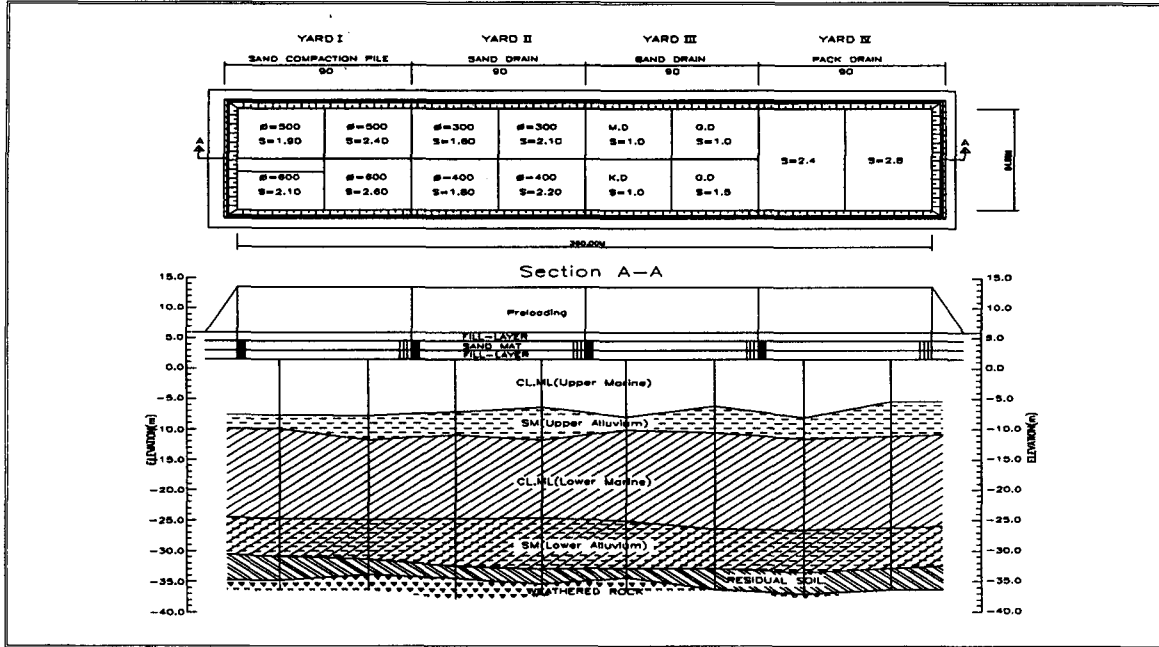


Fig 1. 수직배수재 시험시공 계획 및 지층 구성도

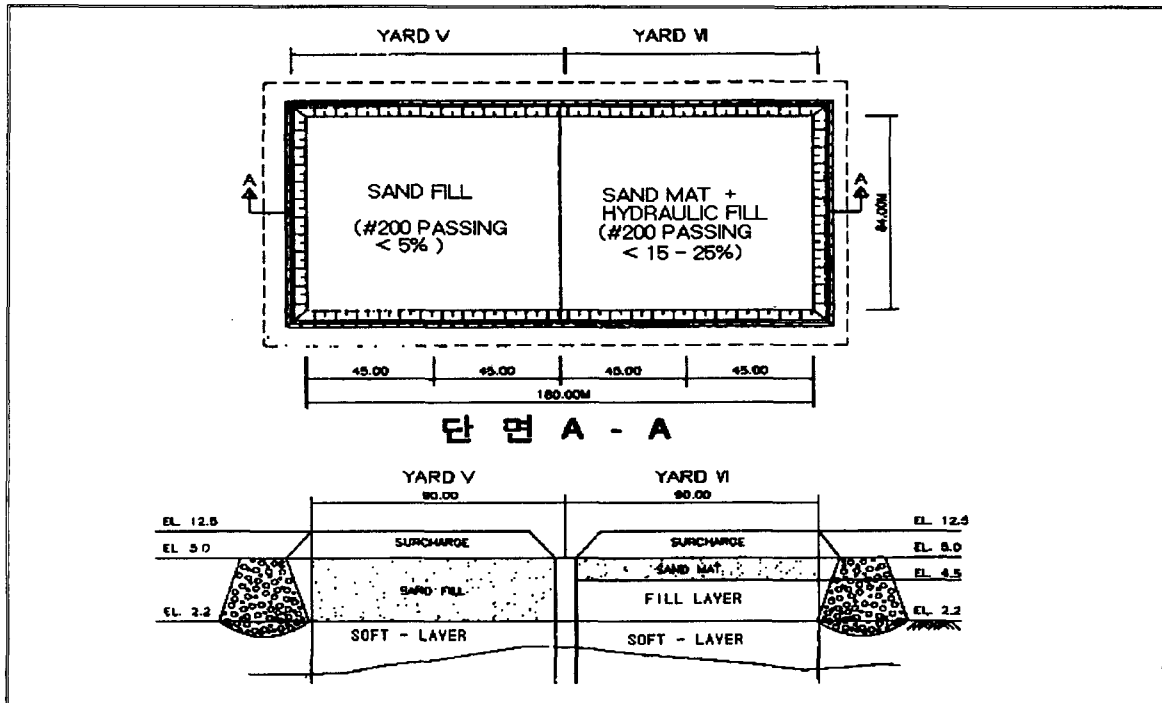


Fig 2. 선행재하 시험시공 계획 및 지질 구성도

3. 지반 특성

본 시험시공은 전체부지를 대표할 수 있는 지점을 고려하여 선정하였다. 지층발달 상태는 대체적으로 지표로부터 상부해성층, 상부 충전층, 하부 퇴적층, 풍화잔류토층 등으로 구분할 수 있다.

상부 해성층은 시험시공 부지 전역에 걸쳐 8.0~10.0m의 층후로 매우 연약 내지 연약한 암갈색의 점토질 실트(ML) 또는 실트질 점토(CL)로 구성되어 있으며, 자연 함수비는 25~38% 정도이고 Rowe Cell 압밀시험결과 과압밀비(OCR)는 1.0~1.3으로 부분적으로 과압밀된 상태이고 Piezocone 조사에 의한 Q_c 값은 대부분 10kg/cm^2 이하의 값을 보이고 있다.

특히 Piezocone 조사결과 연약층 중간중간에

Sand Seam이 발달한 양상을 보여주고 있다.

상부충적층은 주로 갈색의 실트질 모래(SM) 또는 실트질 점토(CL)로 구성되어 있으며 표준관입 시험 N치는 30이상의 분포를 보이고 있고 과압밀비는 1.5~2.2로 과압밀 상태를 나타내고 있으며 국부적으로 본 지층이 나타나지 않은 지역도 있다. 하부 퇴적층은 상부 충전층 하부에 CL, ML과 SM층으로 대부분 표준관입시험 N치가 15회이상으로 매우 조밀한 상태이나 부분적으로 일축압축강도 0.35kg/cm^2 , Piezocone 조사에서 얻어진 Q_c 값이 13kg/cm^2 인 하부 해성층이 약 4~6m 층후로 구성되어 있다. 풍화 잔류토층은 황갈색의 Silt섞인 모래(SM)로서 기반암인 화강암 및 흑운모편마암이 완전히 풍화되어 암으로서 역학적 특성을 상실한 상태로 나타났다.

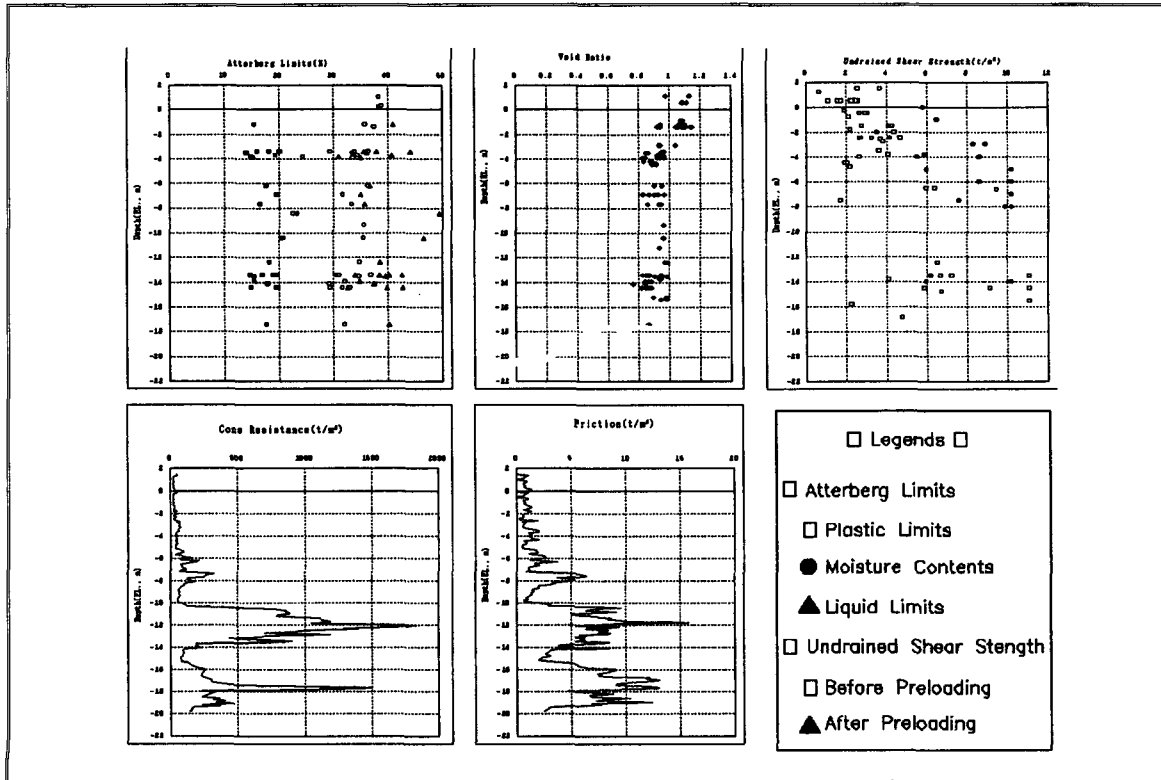


Fig 3. 시험시공 부지의 토질 특성

기술기사

4. 시험시공 및 계측

시험시공은 수직배수재와 프리로딩을 적용한 구간(84m×360m)과 수직배수재, Sand Mat의 효용성을 평가하기 위해 단순 프리로딩만 적용한 구간(84m×180m)으로 분리하여 시행하였으며, 시험시공 성토는 4단계로, 계측기 설치는 그림 4와 같이 실시하였다.

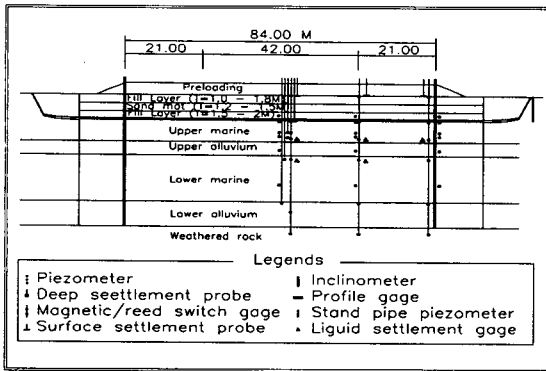


Fig 4. 계측기 설치 단면도

표1. 본 공사 적용에 유용한 계측항목 및 기종 선정

구분	기종	비고	
간극수압계	지하수위	Stand Pipe 식 가장 단순	
	과잉간극수압	진동현식간극수압계	시행자가 계측기에 대한 이해도가 비교적 높은 경우에 해당
		공기식 간극수압계	시행자가 계측기에 대한 이해도가 비교적 높은 경우에 해당
침하계	표면침하	침하판 경제성 양호	
	층별침하	Screw Type 침하봉 구조가 간단, 취급이 양호	
경사계	Force Balance 가속감지기 형식	신뢰도가 높음	
	EL IPI Sensor	연속 측정이 필요한 경우 큰 변위가 예상되는 경우	
Profiler	액체식 Full Profiler	필요시	

- 1단계 : 주행성(Trafficability) 확보를 위한 준설매립 (평균두께 1.5m)
- 2단계 : Sand Mat 포설(1.2m), 수직배수재 타설과 계측기 매설
- 3단계 : 계획된 지반고까지 준설매립 (1.8m)
- 4단계 : 프리로딩 거치 (높이 7.5m)

수직배수재의 타설심도는 상부 충전층의 경우 표준 관입시험 N치가 40이상 조밀한 상태로 되어 있어 관입이 곤란하기 때문에 상부해성층과 상부충전층 일부로 국한하였으며, 하부해성층의 침하거동은 층별침하계로 부터 검토, 분석토록 계획하였다.

계측기는 Preloading 재하 전·후 15개월동안 연약한 해성점토층의 변위, 층별 침하 및 간극수압 등을 측정하기 위해 피에조미터, 침하판, Screw Type 침하봉, 층별침하계, 액체침하계, 간극수압계, 경사계 및 침하 프로파일러 등을 자동화 계측체계로 구축하여 데이터 수집 및 분석에 이용하였다.

5. 계측결과 분석 및 침하특성 평가

매립후 15개월동안 측정된 수직배수재 타설지역중 SD타설지역의 각 깊이별로 측정된 침하량 및 간극수압 분포는 그림 5와 같으며, 이들 결과는 간극수압 소산 및 압밀침하 사이에 밀접한 상관관계를 보여준다. 상부해성층에서 측정된 압밀침하량은 예측된 침하량의 약 2/3인 35cm로써, 이는 실험실에서 구한 보수적인 토질정수와 상부해성층내에 존재하는 견고한 점토층 때문일 것으로 판단된다. 반면, 하부해성층의 침하량은 단지 7cm정도이며 침하의 대부분이 단기간에 완료되므로 별도의 개량은 불필요한 것으로 평가되었다.

그림 5에서 실측된 1차 압밀침하량은 설계시 추정된 재하기간(6개월)보다 단축된 프리로딩 재하 후 3개월 이내에서 대부분 발생되어 Piezocone 조사에서 다수 확인된 Sand Seam이 과잉간극수압의 소산을 촉진시켰을 것으로 판단된다. 또한, SD타설후에 급격한 침하가 발생되었는데 이는 수직배수재 타설시의 공동확장에 의한 수평압축과 진동에 따른 주변지반의 교란으로

유발된 과잉간극수압의 급속한 소산에 따른 결과일 것으로 추정된다.

수직배수재가 설치되지 않은 단순 프리로딩구역의 계측결과는 그림 6과 같다. 전 침하량은 약 43cm로써 P/L재하후 4개월 이내에 대부분의 침하가 완료되었으며, 수직배수재 타설지역보다 상대적으로 큰 침하량을

보인 이유는 상부해상층 내부에 굳은 점토층이 존재하지 않기 때문으로 판단된다. 그림 6에서 보인 것처럼 과잉간극수압은 축적된 사질토층이나 다수의 Sand Seam에 의해 시험시공 외부지역까지 측방으로 소산되어 압밀을 촉진시킨 것으로 추정되며, 과잉간극수압의 소산 및 압밀속도는 수직배수재 타설구간보다 다소

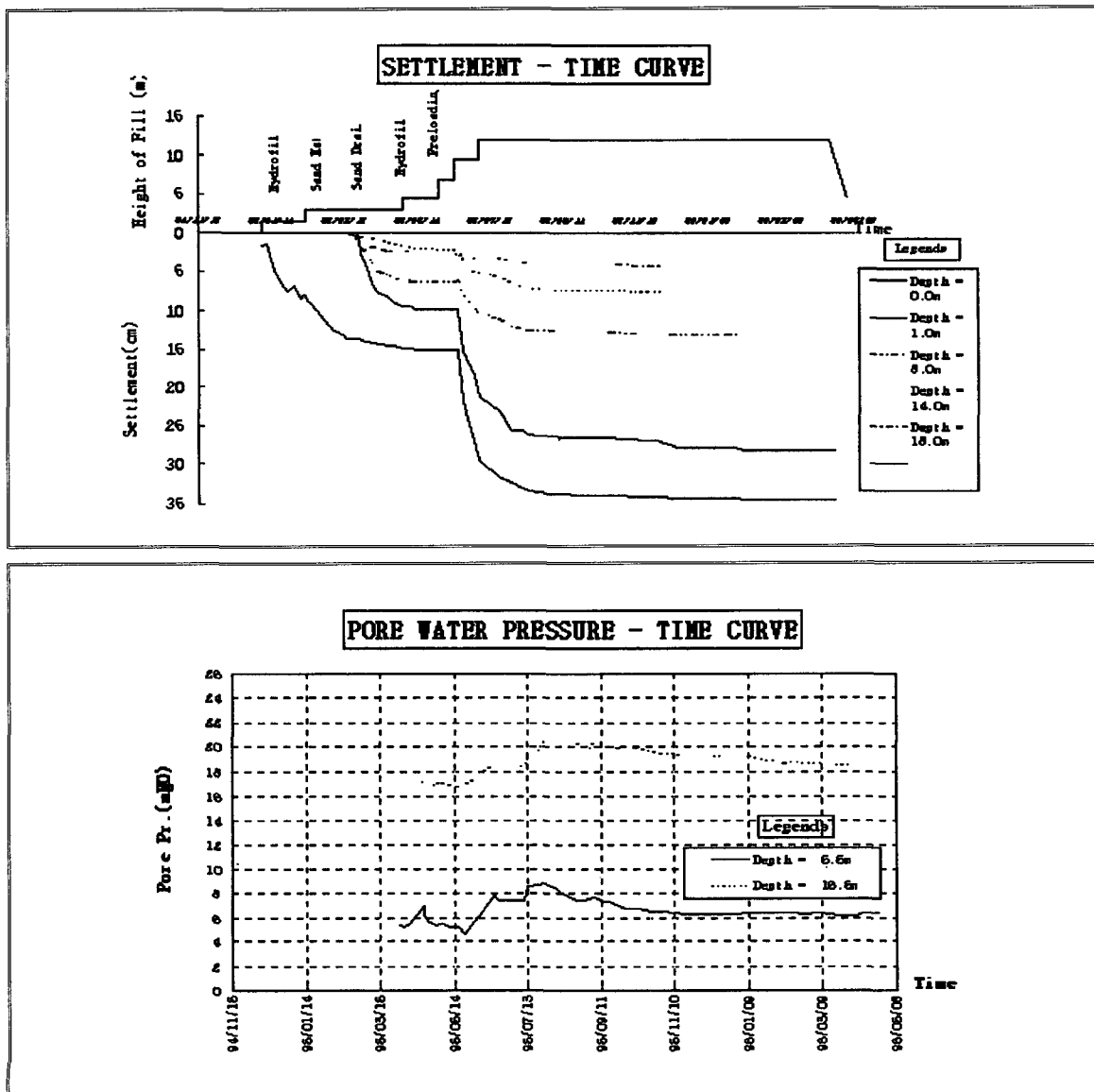


Fig 5. Sand Drain 공법 구간의 계측결과

■ 기술기사 ■

지연된 결과를 알수있다.

또한, 연약지반 개량후 지반상태는 표준관입시험 보다는 Piezocone 또는 Vane에 의한 현장시험에서 뚜렷한 지반의 강도증가를 확인 하였으며, 상부해성층의 지반개량후 비배수 전단강도는 수직배수재 타설지역의 경우 0.4~0.8kg/cm² 으로 증가된 것을 알 수 있었으나,

단순 프리로딩지역의 경우 상대적으로 전단강도가 뚜렷하지 않는 것으로 나타났다. 1차 압밀시 압밀층 두께에 대한 변위량으로 부터 이론적 간극비 감소량은 약 0.1로 산정되었으며, 실내시험 결과 실제 발생한 간극비의 변화량은 약 0.08로 이론적 변화량과 대체적으로 유사하게 나타났으며, 마찬가지로 함수비 감소량은 실

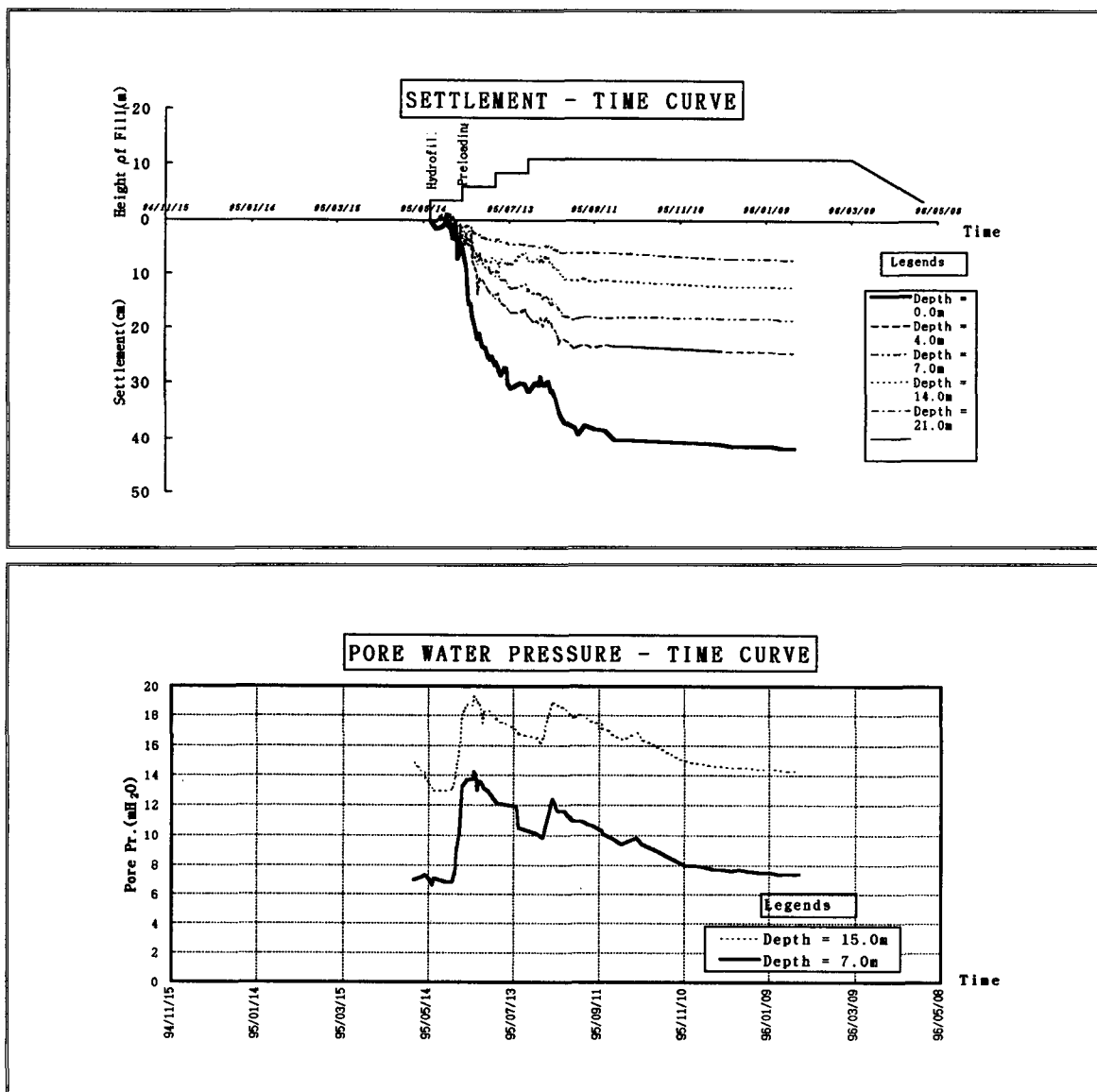


Fig 6. 단순 프리로딩공법 구간의 계측결과

제 약 3%로 이론적 변화량의 3.5%와 유사한 것으로 나타났다.

6. 지반개량공법 비교 및 분석

수직배수재 타설지역에서 측정된 1차 압밀침하의 거동은 그림 7과 같이 시간-침하 곡선의 기울기 또는 곡률은 공법별로 명확히 구분할 수 없을 정도로 유사한 거동을 나타내고 있다. 즉 각 공법별, 직경별, 간격별로 등가 압밀계수가 차이를 나타내고 있지 않아 인천국제공항의 부지에서는 각 공법별 압밀축진 효과가 유사한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Well Resistance, 응력집중(Arching Effect), Smear Effect 등의 영향요소와 Sand Seam의 발달로 압밀축진이 예상외로 빨라져 공법간 침하거동의 차이를 구별할 수 없었던 것으로 판단된다.

본 공사지역에 가장 적합한 최적 개량공법은 수직배수재의 성능, 경제성 및 시공성에 대한 비교분석을 통하여 Sand Drain공법 및 Paper Drain공법이 가장 유리한 공법으로 평가되었다. 시험시공의 계측

결과 수직배수재를 설치하지 않은 단순 성토재하 구간에서 연약층 두께가 평균 9.0m인 지역임에도 불구하고 2~3개월 동안 90%이상의 압밀이 발생하는 것으로 측정되었다. 이러한 사유는 전술한 바와 같이 시험시공지역의 압밀이 당초 실내시험 결과로 예상한 것보다 상당히 빠르게 진전되며, 특히 Sand Seam이 다수 분포하고 있어 이러한 Sand Seam을 통하여 수평배수가 원활히 이루어져 압밀을 촉진시킨 것으로 판단된다. Sand Seam이란 점성토 지층 속에 Sand성분이 층상으로 존재하는 것을 의미하며 점토가 침강·퇴적하는 과정에서 하천의 범람이나 사면활동 등에 의하여 Sand성분이 유입되어 생성된 것으로 점토의 투수계수는 $\alpha \times 10^{-5} \sim \alpha \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 인 데 비해 Sand Seam의 투수계수는 $\alpha \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 이므로 Sand Seam의 투수성은 점토에 비해 약 100배의 투수성을 가진 것으로 시험시공지역에서는 이러한 Sand Seam 존재 등 정밀한 연약지반의 특성이 조사·시험을 통해서 확인되었다.

인천국제공항 부지조성공사에서 하부퇴적층인 연약한 하부해성점토층의 침하량은 대부분 6~9cm의

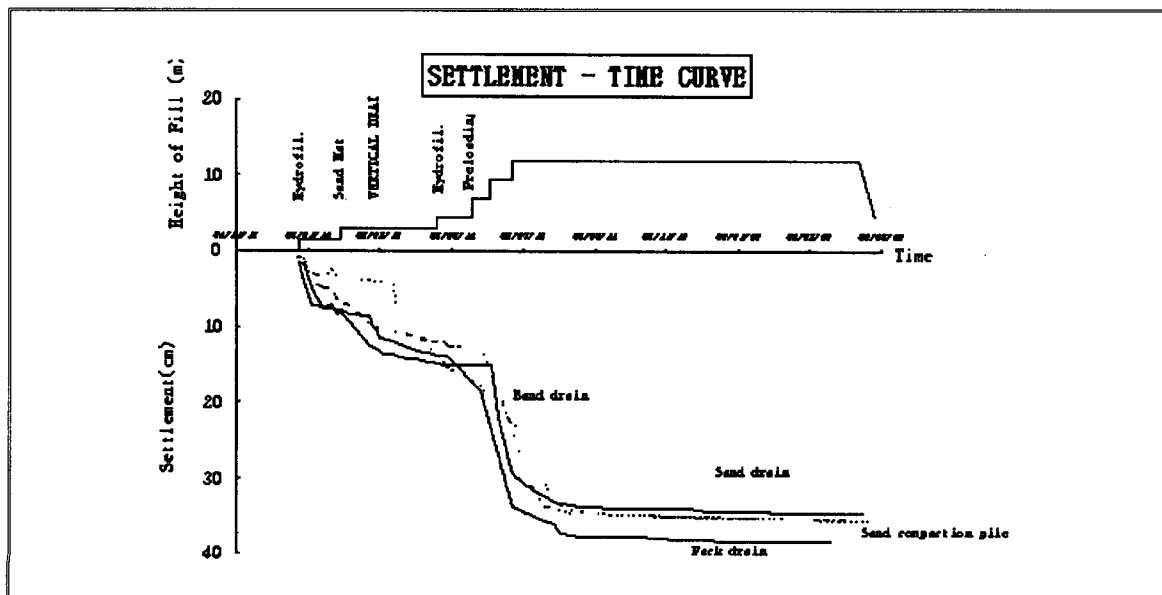


Fig 7. 지반개량공법별 침하특성 비교

기술기사



Fig 7. 지반개량공법별 침하특성 비교

범위를 보이고 있으며, 상·하부의 경계조건이 양호하여 압밀기간이 짧으므로 별도의 수직배수재는 타설하지 않는 것으로 하였다.

7. 결론

- 1) 각 수직배수재의 시간-침하 거동은 비슷한 양상을 보이므로 연약층인 상부해성층의 압밀을 촉진시키기 위해 설치한 각 배수재료의 효율은 명확히 구별할 수 없었다. 이는 상부해성층에 존재하는 다수의 Sand Seam에 의해 방사방향으로 과잉간극수압의 소산이 촉진되기 때문인 것으로 평가되었다.
- 2) 하부해성층은 압밀침하량이 7cm정도로써 상당히 고결된 과압밀 지반이며 대부분의 침하가 단기간에 완료되므로 수직배수재를 설치할 필요가 없었다.
- 3) P/L제거후의 재압축 침하량 및 장기침하량의 합은 포장 및 공용 하중하에서 2~3cm를 초과하지 않을 것으로 예측된다.
- 4) 시험시공 계측결과로부터 얻은 각 종류별 수직배수재의 성능은 비슷하므로 경제성 측면에서 유리한 SD과 PD(PBD)를 수직배수재로 선정하였다.
- 5) 수직배수재가 설치되지 않은 단순 선행재하시험 결과는 상부해성층의 두께가 6m 이하로써 Sand Seam이 존재하는 구간에는 프리로딩만으로 지반개량이 가능함을 보여주었다.

참고문헌

1. 신공항건설공단(1997. 3.) "지반조사 보고서"
2. 신공항건설공단(1995. 12) "수도권신국제공항 부지조성공사 시험시공 관리용역 종합보고서"
3. 신공항건설공단(1992. 12.) "수도권신국제공항 부지조성공사 실시설계 보고서"
4. 신공항건설공단(1992. 12.) "수도권신국제공항 부지조성공사 지반조사 보고서"
5. 한영철, 송정락, 유동덕, 이경수(1995) "연약지반 자동계측 및 분석 시스템"
6. S.Leroueil, F.Tavenas, B.Trak, P.La Rochelle and M.Roy(1989), "Construction Pore Pressures in Clay Foundations under Embankments. Part I : The Saint-Alban Test Fills", Can, Geotech.J.15, pp.54-65
7. A.S Balasbranium and R.P.Brenner(1981), "Consolidation and Settlement of Soft Clay", SOFT CLAY ENGINEERING, Elsevier, pp.480-566
8. V. Choa, G.P.Karunarathe, S.D.Ramaswamy, A. Vijiaratnam and S.L.Lee(1981), "Drain Performance in Changi Marine Clay", 10th ICSMFE, Stockholm, Vol.3
9. T. Akagi(1981), "Effects of Mandrel-

- Driven Sand Drains on Soft Clay”, 10th ICSMFE, Stockholm, Vol.3, pp.581-584
10. D.O.Kwan, G. Mesri(1994), “Settlement of Test Fills for CHEK LAP KOK Airport”, Geotechnical special Publication NO.40, ASCE, Vol.2-1, pp.1082-1099
11. D.C Koutsoftas, P.K.H.Cheung(1994), “Consolidation Settlements and Pore Pressure Dissipation”, Geotech, special Pub.NO.40, ASCE, Vol.2-1
12. Bjerrum.L.(1972). “Embankments on Soft Ground”. state of the Art Report, Proc. ASCE Specialty Conference on Performance of Earth and Earth Supported Structures, Lafayette, Vol.2, pp.1-54
13. K.H.Chang, W.D.KOVACS, MJ.Wu(1994), “ Comparison of Predicted and Measured Settlement of a Test Embankment over soft soil” , Geotechnical Special Publication”, Geotech, Special Pub. NO.40, ASCE, Vol.2-1, pp1164-1175
14. R.P.Long, L.F.Fontaine, B.Olmstead(1994), “Performance of Wick Drains Installed by Vibration”, Geotech, Special Pub. NO.40, ASCE Vol.2-1, pp.1193-1201
15. Chol, K.S, Park.Y.A(1996.5) “Lithostratigraphy and Depositional Environment of the Coastal Deposits in the Youngjong-do Tidal Flat, West Coast of Korea”, International Confernce on Tidal Sedimentology, Savannah, Georgia, USA.

연약지반처리위원회 현장견학 안내

연약지반처리위원회는 1999년도 현장견학을 다음과 같이 실시하오니 회원여러분의 많은 참여를 바랍니다. 교통편의 제한으로 인하여 선착순 45명에 대해 접수를 받을 예정이므로 서둘러 참가신청을 하시기 바랍니다. (학회 사무국으로 신청 요망)

- 다 음 -

- 견학일시 : 1999년 5월 21일~22일
- 견학장소 : 강원도 태백시 화전동 추전역 철도 하부지반 지반보강공사 현장
(발주자: 석탄합리화사업단, 시공자: 송정건설(주) 및 덴버코리아(주))
- 참가회비 : 50,000원(당일 지참)
- 출발장소 : 서초구민회관 앞(양재역 성남방향 버스정류장 150m 전방)
- 출발일시 : 1999년 5월 21일 10:00(09:30까지 집결)
- 일 정

일 시	일 정	비 고
5.21. 10:00	서울 출발	서초구민회관 앞
5.21. 14:00~18:00	현장견학	
5.21. 19:00	숙소도착	덕구온천 콘도미니엄
5.22. 10:00	숙소출발	0565-83-0811~4
5.22. 11:30	오대산 월정사	
5.22. 14:00	방아다리 약수터	
5.22. 17:00	서울 도착	