

인천 국제공항 연약지반 개량 연구사례(III)

김종국^{*1}, 박기순^{*2}, 김학중^{*3}, 이강운^{*4}, 채영수^{*5}

1. 서론

본 사례는 인천국제공항 연약지반개량과 관련된 현장 연구로서, 영종도와 용유도 사이의 간석지를 매립하여 축조한 공항 토목구조물의 하부지반이 연약함으로써 발생하는 지지력 및 침하에 대해 안정성을 확보해야 하므로 본 공사전 시험시공을 통해 선정된 지반개량공법의 적정성을 평가하고자 제반계측 및 지반조사로부터 나타난 지반의 공학적 특성을 평가 분석하였으며, 더불어서 본 공사시에 실시된 조사 및 시험내용을 비교분석하였다. 공항부지는 1,700만평 중 해수부가 1,400만평으로 구성되어 있으며, 평균 심도 5m까지는 대체로 N치가 5이하로 나타났다. 그리고 자연함수비가 30~50% 인 해성 점성토로 구성되어 있어 조수 간만의 차가 약 8~9m로부터 발생하는 선행압밀하중이 8.0~9.0t/m² 임에도 불구하고 상부 해성점토층은 Soft Clay로 나타나 계획 성토고 5.0m일 때 발생하는 압밀침하 발생경향을 감안할 경우 지반개량이 필요한 것으로 나타났다. 따라서 시험시공을 통해 현장에 가장 적절한 지반개량공법의 선정이 요구되었다. 이에 따라 대상 지반에 대해 안정성과 경제성, 시공성, 환경성 등을 종합적으로 검토하여 만족하는 최적의 연약지반 개량공법을 선정하기 위해 계측기를 매설하고 시험시공을 실시하였다.

시험시공은 Vertical Drain 공법으로 Sand Drain(S.D), Plastic Board Drain(P.B.D), Pack Drain, 및 Sand Compaction Pile(S.C.P)공법을 실시하였고, 더불어서 Preloading 공법을 적용하였으며, 적용공법의 적정성과 지반개량 효과를 확인하기 위해 실시된 실내·외 조사 및 계측자료 등으로부터 압밀도 외에 지반특성에 대해 비교 분석 하였으며, 장기 계측시스템에 의한 침하관리와 유지관리의 필요성 등을 검토하였다.

2. 지반 조건

연약지반의 지층 분포상태는 표 1과 같이 상부로부터 상부해성층, 상부층적층, 하부해성층, 하부층적층, 풍화간류토 및 암반으로 구성되어 있다. 상부해성층은 시험시공 부지 전역에 걸쳐 8.0~10.0m의 층후로 매우 연약 내지 연약한 암갈색의 점토질 실트(ML) 또는 실트질 점토(CL)로 구성되어 있다. 그리고, 자연 함수비는 25~38% 정도이고, Rowe Cell 압밀시험결과 과압밀비(OCR)는 1.0~1.3으로 부분적으로 과압밀된 상태이며, Piezocone 조사에 의한 선단저항값(q_s)은 대부분 10kg/cm² 이하를 보이고 있다. 특히 Piezocone 조사결과 1지점에서 연약층 사이에 존재하는 Sand Seam은 5~20cm의 두께로 2~4개 정도 발달되어 있다. 상부층적층은 주로 갈색의 실트질 모래(SM) 또는 실트질 점토(CL)로 구성되어 있으며, 표준관입시험 결과 N치는 10~15의

*1 정회원, 한국건설품질시험원 지반기술팀 과장
 *2 정회원, 인천국제공항공사 기술개발팀 과장
 *3 정회원, 인천국제공항공사 기술개발팀 과장
 *4 정회원, (주)동성엔지니어링 상무이사
 *5 정회원, 수원대학교 공과대학 토목공학과 교수

표 1. 인천국제공항 지역의 대표적인 원지반조건

심도(m)	지층구성	자연함수비 w _n (%)	소성지수 I _p (%)	액성한계 w _L (%)	c _v × 10 ³ (cm ² /sec)	N치	q _c (kg/cm ²)	축의분류
0	Upper Marine Layer	26.3~39.4	3.6~23.9	30.0~40.2	2~28	0~6	1~10	ML~CL
6	Upper Alluvial Layer	27.7~33.7	-	-	-	1~50	20~203.8	ML~SM
10	Lower Marine Layer	25~33.4	17.6~29.1	30.0~44.2	1~15	4~33/30cm	13.1~327	ML~CL
16	Lower Alluvial Layer	15.2~26.6	-	-	-	15~50/13cm	-	SM
35	Residual Soil	16.7~18.3	NP	NP	-	38/30~50/7cm	-	-

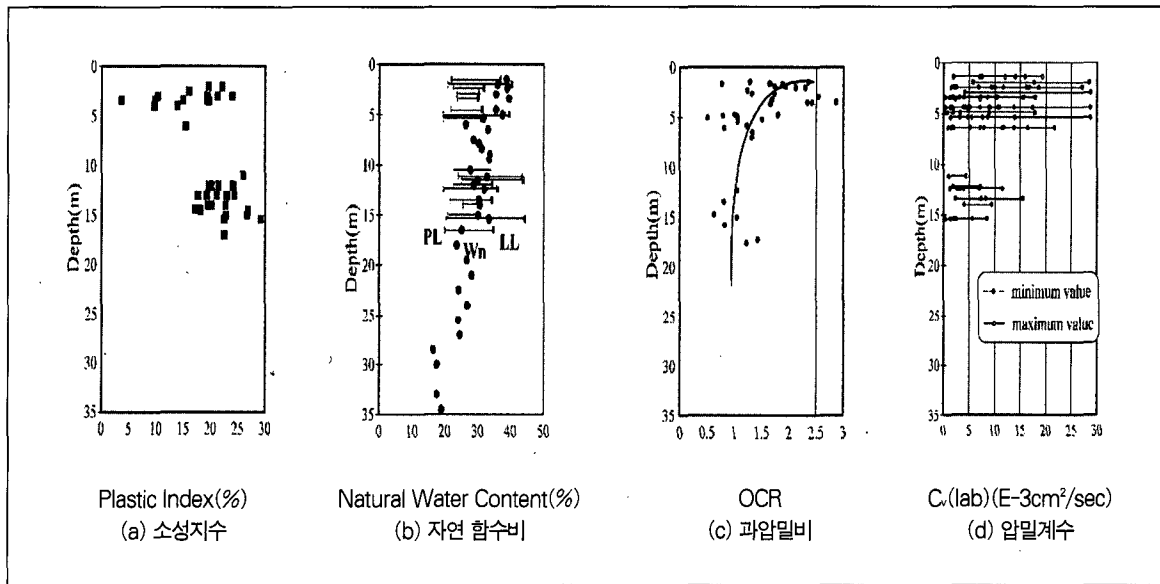


그림 1. 지반의 공학적 특성

분포를 보이고 있다. 그리고 과압밀비는 1.0~2.5로 나타나 과압밀 상태를 띠고 있으며 위치에 따라 그 경향은 다르다. 하부해성층은 약 4~6m 층후로 구성되어 있고 N치는 6~10이며, 하부층적층은 CL, ML과 SM층으로 대부분 N치가 20회 이상의 매우 조밀한 상태이다.

심도별 지반의 공학적특성을 파악하기 위해 소성 지수와 자연함수비, 압밀계수 및 과압밀비를 살펴본 결과 소성지수는 15~25%, 자연함수비는 소성한계와 액성한계 사이에, 과압밀비는 1.0~2.5 범위로 나타난바, 비교적 표층 부근에서는 조수 간만의 차에 따른 수압이 작용하였던 것으로 추정되며, 하부로 갈

수록 지반이 안정화된 것을 알 수 있다.(그림 1 참조)

풍화잔류토층은 황갈색의 실트쉬인 모래(SM)로서 기반암인 화강암 및 흑운모편마암이 완전히 풍화되어 모암의 특성을 상실한 상태로 나타났다. 이와 같이 공항지역 연약지반의 경우 상부연약층의 층후가 다른 지층에 비하여 비교적 두텁고 퇴적상태가 매우 불규칙하게 분포되어 있는 것이 특징이다.

한편 본 현장 지반조건은 동남아시아 국제공항 지반조건에 비해 표 2와 같이 양호한 것으로 비교 평가 된다.

표 2. 인천국제공항과 외국 경쟁공항의 지반특성 비교

구 분		인천국제공항	일본간사이공항	홍콩첵렙콕공항	싱가폴창이공항
입도분포(%)	Silt	80 ~ 90	40 ~ 60	50	-
	Clay	10 ~ 20	40 ~ 60	50	-
자연함수비(%)		30 ~ 50	70 ~ 120	80 ~ 120	50 ~ 60
액성한계(%)		26 ~ 50	30 ~ 120	60 ~ 100	80 ~ 90
소성한계(%)		10 ~ 20	10 ~ 80	45 ~ 65	20 ~ 30
초기간극비		0.9 ~ 1.3	2.2 ~ 2.6	1.0 ~ 3.0	1.6 ~ 2.4
압축지수		0.233	0.6 ~ 0.8	1.0	0.75 ~ 1.45
압밀계수(cm/sec)		$(3\sim5)\times 10^{-3}$	$(1)\times 10^{-3}$	$(1\sim1.5)\times 10^{-3}$	$(1\sim1.9)\times 10^{-3}$
비배수강도(kg/cm ²)		0.10~0.25	0.025	0.05~0.25	-

3. 시험시공

3.1 개요

연약지반상에 건설되는 인천국제공항의 활주로, 유도로, 계류장 등의 토목구조물은 상재하중에 대해 지지력 뿐만 아니라 침하량이 허용 잔류침하 기준을 만족하여야 하므로 연약지반의 개량 여부를 판단하고자 그림 2와 같은 지층단면 및 하중조건에 대해 압밀침하량을 산정 하였으며, 산정 결과 상부해성층은 14~56cm로 나타나 허용 잔류침하량 기준(10cm)을 초과하여 지반개량이 필요한 것으로 나타났다.

또한, 해성층의 투수계수가 $1\times 10^{-5}\sim 7$ cm/sec 인 조건에서 상기 침하량을 제한된 기간(약 12개월 ~

24개월)내에 압밀을 완료하기 위해서는 무리가 있으므로 Vertical Drain 공법이 요구되었다. 이 때 연약지반의 개량대상심도는 N치가 5이하 크기까지 가정하여 개량범위를 선정 하였으며, 선행하중(Preloading, P/L)은 개량 후 공용하중보다 1.2~1.5배 크게 재하하는 것으로 가정하였다.

따라서 상부해성층이 연약지반개량의 주 대상범위로 가정된 바 본 지층에 대해 시험시공을 실시하였으며, 이의 가정단면은 그림 3과 같다.

3.2 시공계획

본 공사에 앞서 가장 적절한 지반개량공법을 선정하기 위하여 전체부지를 대표할 수 있는 지점의 연약지반을 선정하여 시험시공을 수행하였다. 시험시공

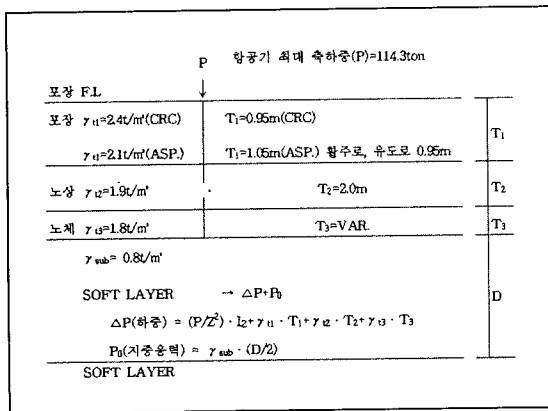


그림 2. 지층단면 및 하중조건

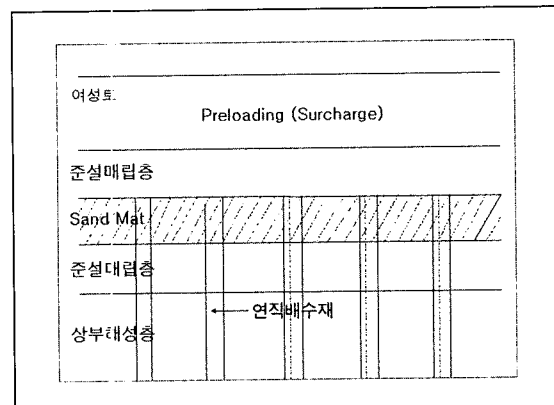


그림 3. 지반 개량 단면도

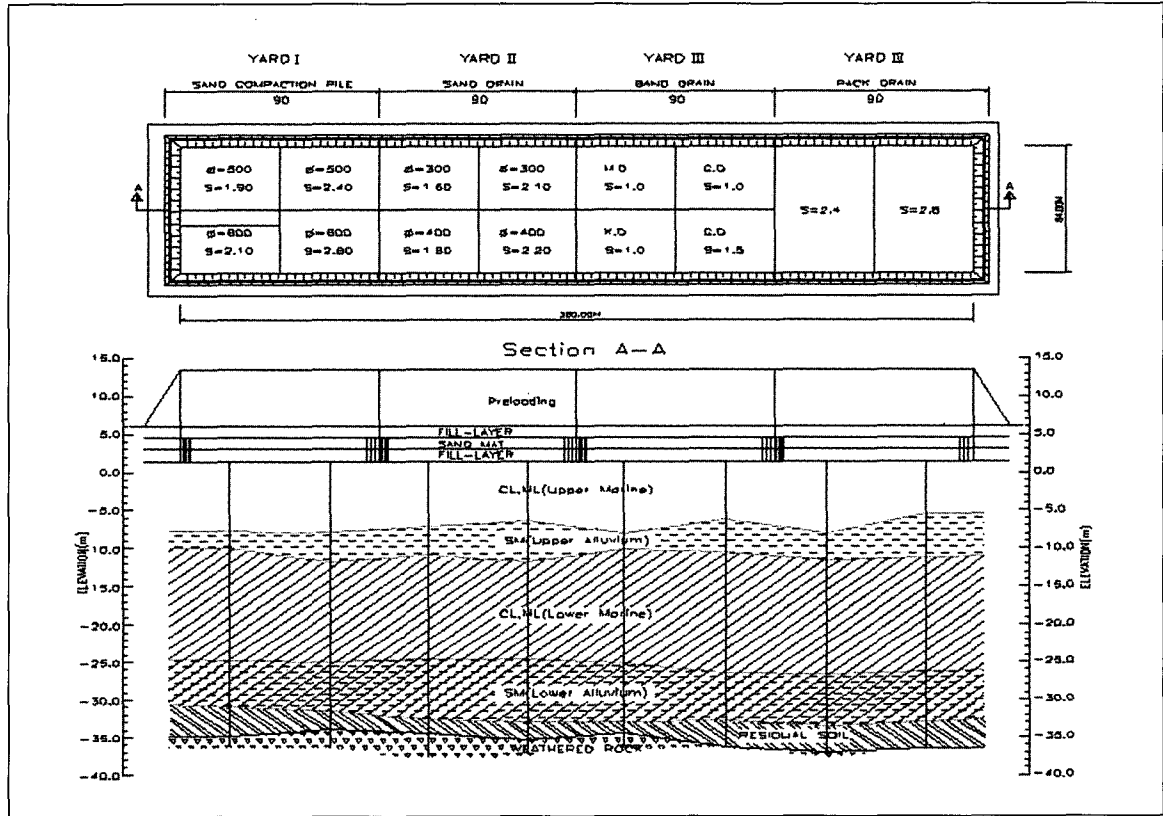


그림 4. 수직배수재 시험시공계획 및 지층구성도

은 Vertical Drain 구간과 Preloading 구간으로 구분하여 수행하였으며, 적용된 Vertical Drain 공법은 Sand Drain, Plastic Board Drain, Pack Drain, 및 Sand Compaction Pile 공법으로 구분하였고, 더불어서 Preloading 공법을 병행하여 실시하였다. 이에 대해 적용된 단면 및 공법별 적용구역은 그림 4와 같다.

3.3 시공방법

연약지반 처리방법은 크게 나누어 단순성도에 의해 지반의 압밀침하를 촉진시키는 선행하중 재하 공법(Preloading)과 투수성이 큰 배수재를 지중에 타입하여 압밀, 배수를 촉진하는 연직 배수공법

(Vertical Drain)공법으로 구분된다. 이에 본 현장에 적용된 지반처리방법을 공법별로 나열하면 다음과 같다.

3.3.1 선행하중 재하(Preloading) 공법

본 공법은 그림 5와 같이 원지반상에 성토하중을 미리 가하여 상부구조물에 유해한 압밀침하를 미리

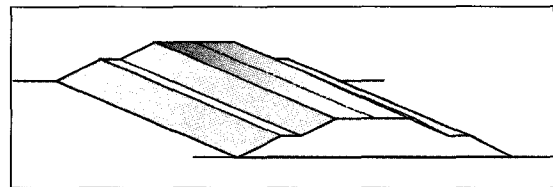


그림 5. Preloading 공법 모식도

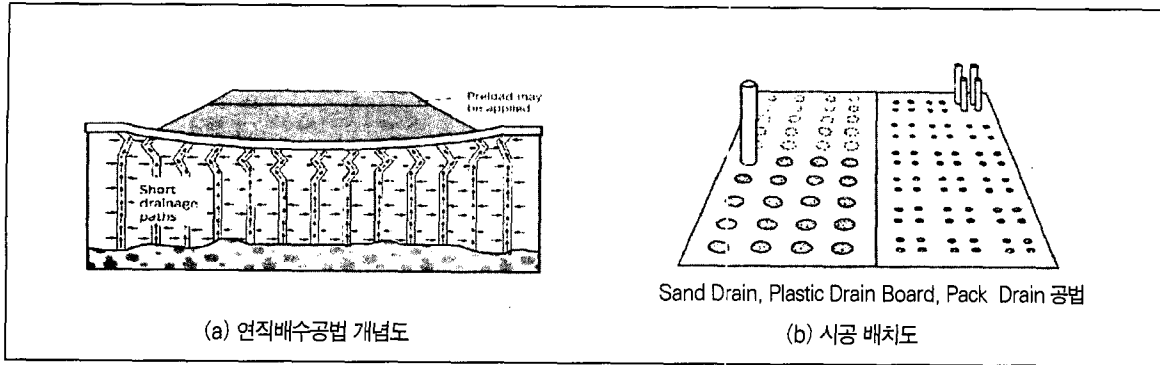


그림 6. 연직배수공법 모식도

종료시키고 더불어 지반의 강도증가 효과를 얻는 공법으로서 공사비가 저렴하고, 품질관리가 쉬우나 공사기간이 길고, 단일공법 적용시 지반개량 효과가 상대적으로 낮은 단점이 있다. 따라서 본 공법은 연약 지반의 두께가 작거나 비교적 투수성이 양호한 실트질 지반이나 사질토 지반에 적절한 공법이다. 그리고 지반조건에 따라 성토하중고의 크기를 제한할 수 밖에 없는 경우가 발생하기도 한다.

3.3.2 Vertical Drain 공법

Vertical Drain 공법은 기본개념상 투수성이 매우 작은 점성토지반에서 상재하중으로 인해 발생한 과잉간극수압이 장기간에 걸쳐 소산되므로 이를 단기간에 소산시키고자 지반에 배수재를 타입하여 배수 거리를 작게해서 압밀침하 시간을 단축시키는 공법으로서, 그 대표적인 모식도는 그림 6과 같다.



그림 7. 공사전경 및 배치도

가. Sand Drain 공법

본 공법은 그림 7과 같이 지중에 직경이 400mm 내외인 모래말뚝을 일정한 간격으로 수직으로 타설하여 지반내 과잉간극수압을 수직 모래말뚝을 통하여 배출시킴으로서 압밀을 촉진시키는 공법으로서, 국내 시공실적이 많고, 장기간 사용이 가능하나 타설시 Smear 효과가 발생하여 배수기능이 저하되고, Drain 단면이 지반의 수평력에 의하여 절단될 경우 배수기능을 상실할 우려가 있고, Drain용 모래가 다량 필요하므로 하상골재 구입이 점차 어려운 상황에서 그 적용성은 낮아지고 있다.

나. Plastic Drain Board 공법

본 공법은 지중에 그림 8에서 보는 바와 같이 다공질의 Plastic Drain Board(100mm×3mm)를 타설하여 지반의 간극수를 수직으로 배출시키는 공법으

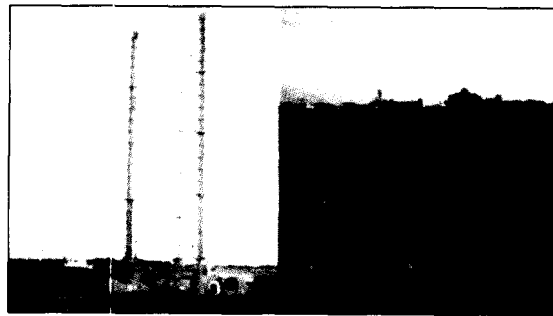


그림 8. 공사전경 및 배치도

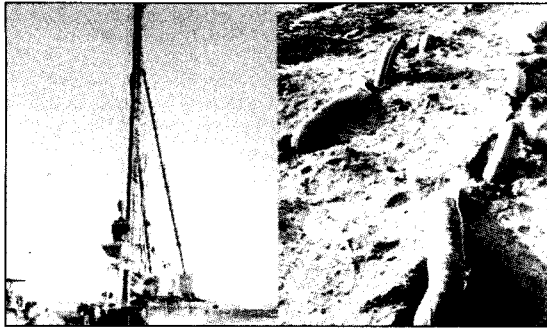


그림 9. 공사전경 및 배치도

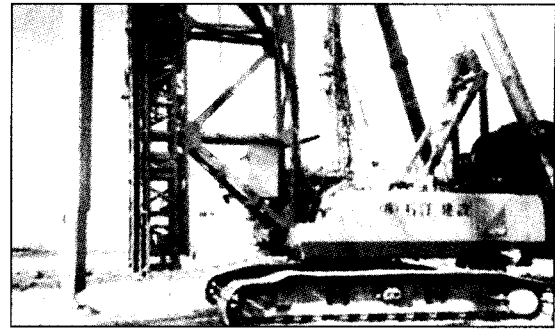


그림 10. 공사전경

로서 기본 개념은 Sand Drain 공법과 유사하나 재료를 인위적으로 제작하여 사용하므로 재료구입의 어려움이 없는 공법이다. 장점으로 Drain Board의 취득이 용이하며, 국내 시공실적이 많고, 시공속도가 빠르며, 장비의 규모가 작아 개량면적이 작을 경우 유리하나 장기간 사용할 때 Drain Board의 부식 등 열화현상 발생우려가 있고, 최근에는 환경문제를 유발시켜 재료의 개발이 필요한 상황이다.

다. Pack Drain 공법

지중에 직경이 120mm 정도의 망태에 쌓인 모래말뚝을 동시에 4개나 6개씩 수직으로 타설하여 지반의 간극수를 배수시켜 압밀을 촉진시키는 공법으로서 개량효과가 탁월하며, 시공속도가 빠르고, 장기간 사용이 가능하며, 개량심도가 깊다. 그리고 Sand Drain 공법과 같이 배수단면의 절단 가능성이 아주 적으나 국내 시공실적이 적으며 경제성면에서 다소 불리한 단점을 안고 있다.

라. Sand Compaction Pile 공법

Sand Compaction Pile 공법은 Vertical Drain 공법이라기 보다는 일종의 지반보강공법의 일종으로서 기능적으로 이 두가지 효과를 동시에 만족하는 특성을 갖고 있다. 즉 진동 충격하중을 이용하여 모래를 압입시켜 직경이 큰 압축된 다짐모래 기둥을 조성하여 Sand Drain 효과 및 치환에 따른 지반 강도 증가 효과를 얻는 공법으로서 복합지반을 형성하여 지내

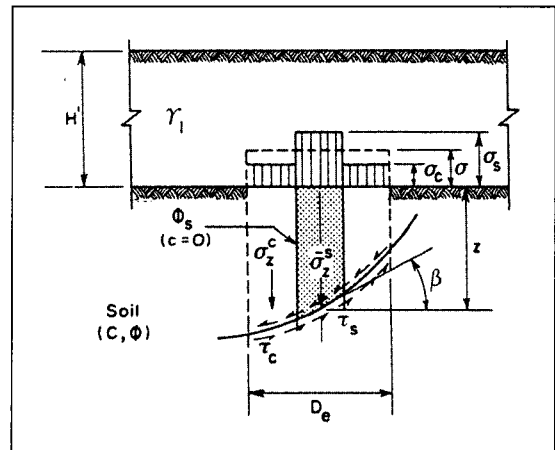


그림 11. 복합지반 형성 모식도

력 및 전단강도를 증가시켜 활동을 방지할 뿐만 아니라 모래기둥의 응력집중 효과로 압밀량을 저감시키는 효과가 있으나 다량의 재료구입의 어려움이 있으며, 다짐시간과 투입모래량 측정 등 시공관리가 어려워 정량적인 강도증가 효과를 구하기 어려운 문제점을 안고 있다. 공사전경은 그림 10이고, 기본개념은 그림 11과 같다.

3.4 결과분석

3.4.1 계측기 설치

계측기는 재하 전·후 15개월동안 연약 해성점토층의 변위, 층별 침하 및 간극수압 등을 측정하기 위해 다음 그림 12와 같이 피에조미터, 침하판, Screw

표 3. 본 공사에 이용한 계측항목 및 기종 선정

구분	기종	비고	
간극수압계	지하수위	Stand Pipe 식	가장 단순
	과잉 간극수압	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	

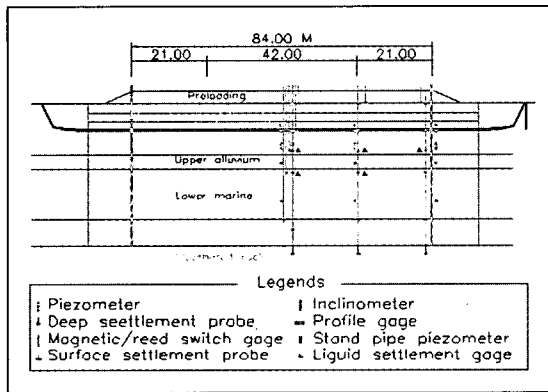


그림 12. 계측기 설치 단면도

Type 침하봉, 층별 침하계, 액체 침하계, 간극수압계, 경사계 및 침하 프로파일러 등을 설치하였으며, 계측결과의 신뢰성을 확보하기 위해 자동화 계측체계로 구축하여 데이터 수집 및 분석에 이용하였다.

이에 본공사의 계측에 사용된 계측항목 및 기종 선정 기준은 표 3이다.

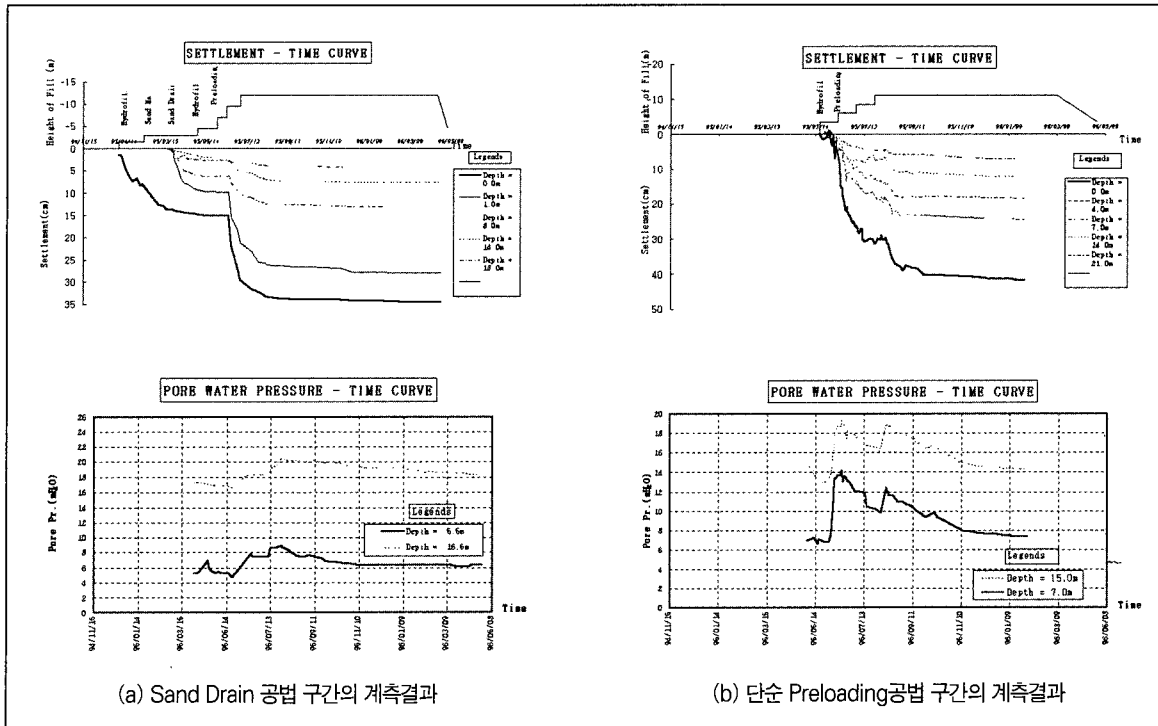
3.4.2 계측결과

계측기 매설 후 15개월동안 수직배수재 타설지역과 단순 Preloading 지역으로 구분하여 측정된 계측결과는 그림 13과 같다. 그림에 나타난 바와 같이 계측기 매설심도에 따른 침하발생량은 대부분 상부 해상층에서 발생한 것으로 나타났으며, 하부해상층의 침하량은 5.0~10 cm 인 것으로 나타났다.

또한 재하 후 침하가 종료되는 시간은 Vertical

Drain 공법이나 단순 Preloading 지역과 관계없이 약 3~4개월 내에서 완료되는 것으로 나타나 Piezocone 조사시 지층사이에 분포하는 Sand Seam 의 역할이 컸던 것으로 판단된다. Sand Seam이란 점성토 지층속에 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 100배 이상의 투수성을 가진 것으로 시험시공지역에서는 이러한 Sand Seam 존재 등 정밀한 연약지반의 특성이 조사·시험을 통해서 확인되었다(그림 14).

그리고, SD타설후에 급격한 침하가 발생되었는데 이는 수직배수재 타설시의 공동확장에 의한 수평압축과 진동에 따른 주변지반의 교란으로 유발된 과잉 간극수압의 급속한 소산에 따른 결과일 것으로 추정된다. 한편 과잉간극수압은 압밀이 완료된 후에도 약 2~3개월에 걸쳐 지속적으로 소산되는 것으로 나타나, 침하에 의한 압밀도와 과잉간극수압 소산속도에 따른 압밀도와는 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 따라서 단계별 재하성토시 이같은 차가 발생하는 것에 대해 원인분석 후 성토를 실시하는 것이 타당할 것으로 판단되며, 병행하여 시간에 따른 강도증가 비로부터 압밀도를 산정하는 것이 타당한 것으로 나타났다.



(a) Sand Drain 공법 구간의 계측결과

(b) 단순 Preloading공법 구간의 계측결과

그림 13. 시간별 계측결과 추이도



그림 14. Sand Seam 조사 결과도

따라서 지반개량정도를 파악하기 위해 현장시험 (Piezocone 또는 Vane 등) 으로부터 지반의 비배수 전단강도 증가를 확인한 결과 수직배수재 타설지역의 경우 0.4~0.8kg/cm² 이 증가된 것으로 나타났으나 단순 Preloading 지역의 경우는 상대적으로 전단

강도의 증가정도가 낮은 것으로 나타났다. 1차 압밀 시 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, 함수비 감소량도 약 3%로 나타나 이론적 변화량의 3.5%와 유사한 것으로 나타났다.

또한 Vertical Drain 공법의 적정성을 비교평가하기 위해 단순 1차 압밀침하의 거동을 비교하여 나타낸 것이 그림 15이다. 그림 15와 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(Archiving Effect), Smear Effect 등의 영향요소와 Sand

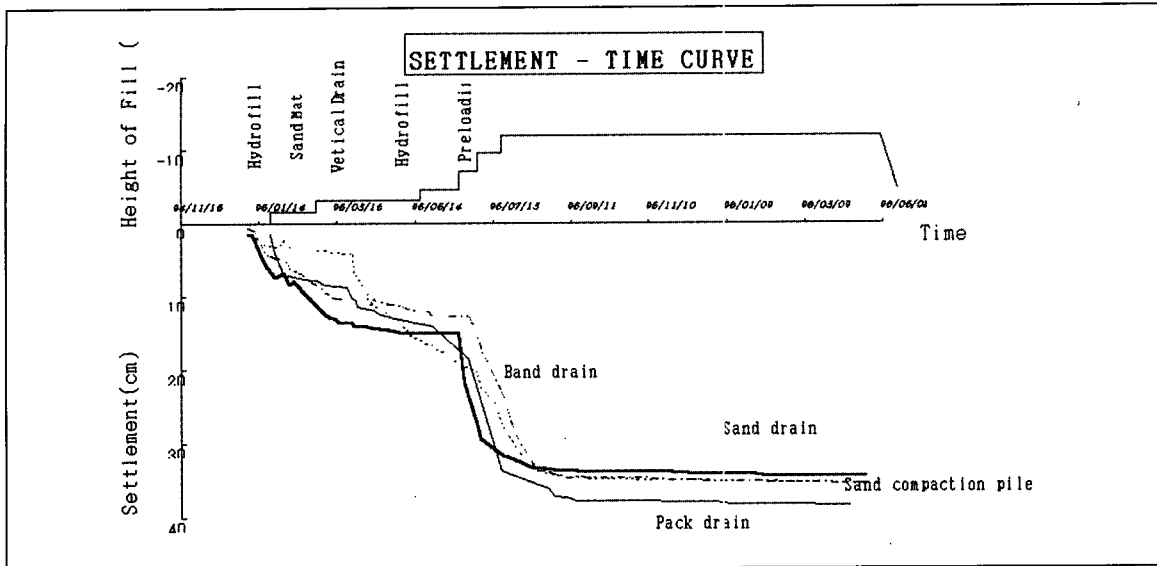


그림 15. 지반개량 공법별 시간에 따른 침하특성 비교

Seam의 발달로 압밀축진이 예상외로 빨라져 공법간 침하거동의 차이를 구별할 수 없었던 것으로 판단된다.

상기 침하거동을 근거로 수직배수재의 성능, 경제성 및 시공성을 비교 평가하여 Sand Drain공법 및 Plastic Board Drain공법을 본 현장에 좋은 공법으로 선정하였다. 그리고 단순 Preloading 구간도 연약층 두께가 평균 9.0m임에도 불구하고 2~3개월 동안 90%이상의 압밀이 발생하는 것으로 나타났다. 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.

또한 하부퇴적층인 해성점토층의 침하량은 대부분 6~9cm의 범위를 보이고 있으며, 상하부의 경계조건이 양호하여 압밀기간이 짧으므로 별도의 수직배수재는 타설하지 않는 것으로 하였다.

4. 본시공

4.1 개요

시험시공으로부터 선정된 Vertical Drain 공법인 Sand Drain공법과 Plastic Board Drain공법을 본 현장 토목 구조물인 활주로와 유도로, 계류장 지역에 대해 적용하였으며, 이에 대해 적용계획을 요약하면 표 4와 같으며, 지반개량 시공절차는 시험시공 결과에 의거 다음과 같은 순서로 실시하였다. 그리고 토목시설공사중 활주로의 연약지반개량 단면도는 그림

표 4. 구조물 종류별 개량계획

공종	배수재 간격	P/L 높이	허용잔류침하량
활주로	S.D ϕ 400 2.8×2.8m	4.9~5.6m	7.5cm (상부해성층2.5cm+ 하부해성층5.0cm)
	P.B.D 1.6×1.6~2.0×2.0m	5.5~7.3m	
유도로	S.D ϕ 400 3.3×3.3~3.4×3.4m	4.0~5.6m	10.0cm (상부해성층5.0cm+ 하부해성층5.0cm)
	P.B.D 1.6×1.6~2.0×2.0m	4.1~5.2m	
계류장	S.D ϕ 400 3.0×3.0~3.5×3.5m	4.6~5.4m	10.0cm (상부해성층5.0cm+ 하부해성층5.0cm)

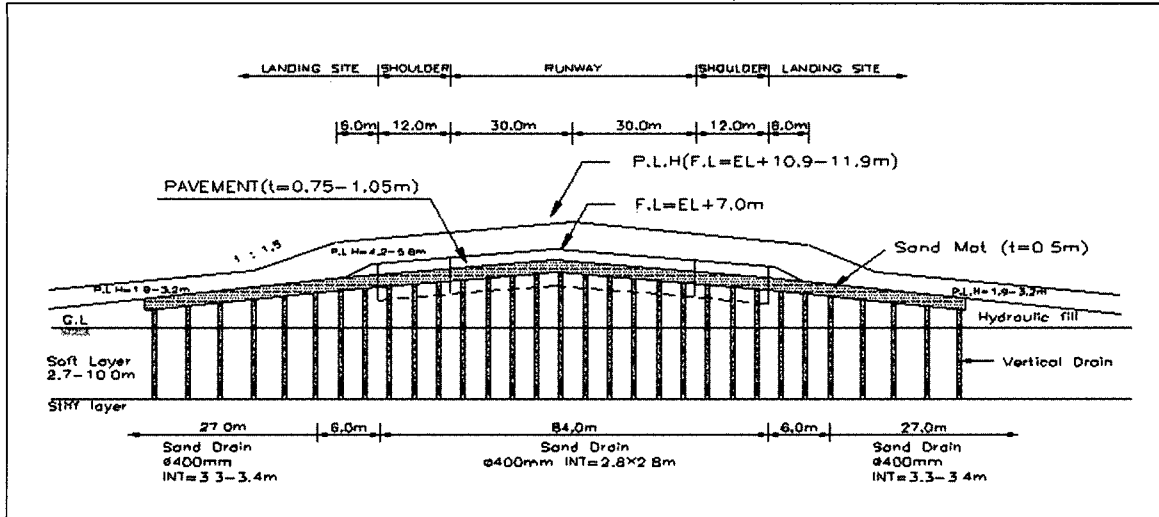


그림 16. 연약지반개량 단면도

16과 같다.

- ①시추에 의한 연약지반 사전조사 : 원지반상태에서 시행
- ②계측기 매설 및 준설매립(계측기 종류: 침하판, 층별침하계, 지하수위계, 간극수압계 등)
- ③연직배수재 타설(Sand Drain, Plastic Board Drain)
- ④Preloading 재하(재하기간: 3~6개월, 압밀도: 90~95%)
- ⑤계측결과 확인 : 지반개량 적정여부 검토
- ⑥사후 지반조사 및 실내시험 : 계측결과와 비교하여 지반개량 적정여부 검토
- ⑦Preloading 제거

한편 활주로, 유도로, 계류장의 허용 잔류침하량 기준치는 각각 7.5cm, 10cm, 10cm로 설정하였으나 본 지역의 퇴적층은 매우 불규칙하고 또한 향후 하부해성층의 2차 압밀침하가 우려되어 활주로는 2.5cm, 유도로 및 계류장은 5.0cm 이내로 제한하여 공사 완료 후 항공기의 이착륙시 동적하중이 작용한다 하더라도 공항 활주로로서의 기능을 만족하기에 무리가 없도록 하였다.

또한 지반개량 시공공정은 4단계로 이루어졌으며,

이에 대한 단계별 공정은 아래와 같다.

- 1단계 : 주행성(Trafficability) 확보를 위한 준설매립(평균두께 1.5m)
- 2단계 : Sand Mat 포설(약 1.2m), 연직배수재 타설과 계측기 매설
- 3단계 : 계획된 지반고까지 준설매립 (평균 1.8m)
- 4단계 : Preloading(P/L) 거치 (평균 높이 7.5m)

4.2 지반개량 분석

4.2.1 지반특성 분석

지반개량 정도는 계측결과로부터 나타난 압밀도에 의해 판단할 수 있을 뿐만아니라 지반의 강도증가를 등의 지반특성 변화정도로부터 파악할 수 있으므로, 이로부터 본 현장 지반개량 정도를 파악하였다. 특히 단계별 성토에 따른 성토고 결정시 안정성을 판단하기 위해서는 지반 강도증가를 산정이 무엇보다 중요요인으로 작용하므로 현장 시공관리 및 안정성을 확인하기 위해 실시되었다. 이에 대해 본 현장의 재하 전후 전반적인 지반특성정도를 보면 그림 17과 같다.

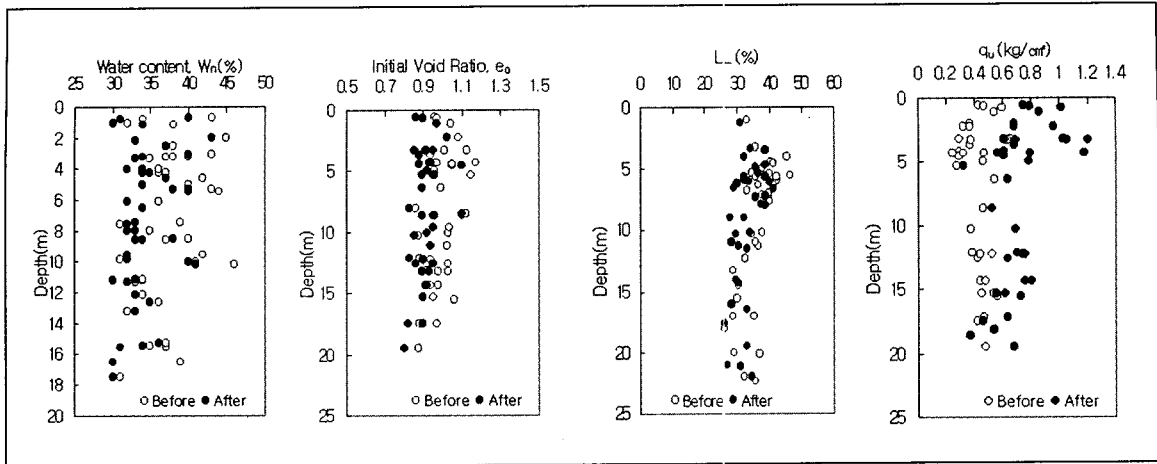


그림 17. 선행재하 전·후의 토질 정수의 변화

지반개량전 조사결과 나타난 지반특성은 자연함수비(W_n)는 액성한계와 유사한 경향을 나타내며, 하부로 갈수록 함수비가 서서히 감소하고 있는 것으로 나타났다. 특히 활주로, 유도로 및 계류장지역의 경우 개량 전후 토질정수 변화를 보면 자연함수비와 간극비(e)는 다소 감소하는 경향을 보이고 있고, 일축압축강도(q_u)는 증가하는 것으로 나타났다. 이 때 초기 함수비와 초기 간극비의 이론적인 변화량은 10% 정도로 예상돼 실측값과 유사한 것으로 나타났다.

실내 삼축압축시험기로 36개의 비압밀비배수(UU)시험을 수행한 결과 유효응력증분에 대한 비배수 전단강도 증가분($\Delta s_u / \Delta \sigma'_v$)은 0.01~0.62 정도로 그 분산도가 매우 크게 나타났다. 이는 연약층의 심도가 불규칙함에 따라 상재하중에 따른 전단강도 증가율도 불규칙하기 때문인 것을 알 수 있었다. 또한, 본 시험 결과들은 모집단에서 일정 표본을 추출한 확률표본으로 가정하고 이 확률표본을 근거로 하여 비배수전단강도 증가율에 대한 분포를 산정하였다. 본 연구에서는 정규 모집단에서 표본의 크기가 작을 때 특히 유용하게 쓰이는 t 분포(W.S.Gosset)를 사용하여 비배수전단강도 증가율의 90% 신뢰구간을 산정하였고 t 분포도를 이용하여 목표로 하는

신뢰구간은 식(1)을 이용하여 구하였다.

$$X \pm K \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

여기서,

X : 확률 표본의 평균값,

K : 신뢰구간에 따른 상수,

σ : 표본 표준편차, n : 표본의 개수

이들 삼축압축시험의 비압밀비배수(UU)시험을 수행한 결과를 이용하여 통계 처리한 모평균 90% 신뢰구간은 $((\Delta s_u / \sigma'_v)_{UU_{test}} = 0.19 \pm 0.04)$ 로 나타났다. 한편, 현장조사 방법인 현장 베인시험 결과와 Piezocone결과를 이용하여 비배수전단강도 증가율을 정량적으로 분석하였다. 유효응력 증분에 따른 비배수 전단강도 증분($\Delta s_u / \sigma'_v$)을 산정한 현장 베인시험 평균값은 대략 0.39로 매우 큰 비배수전단강도 증대를 보이고 있는 것으로 나타났으나 그 분산정도는 매우 큰 것으로 나타났다. 특히 동일 지역내에서도 강도증가율 값의 차는 큰 것으로 나타났다.

그림 18은 콘관입 저항치로부터 지반개량 전·후의 비배수 전단강도를 나타낸 것으로서 산정된

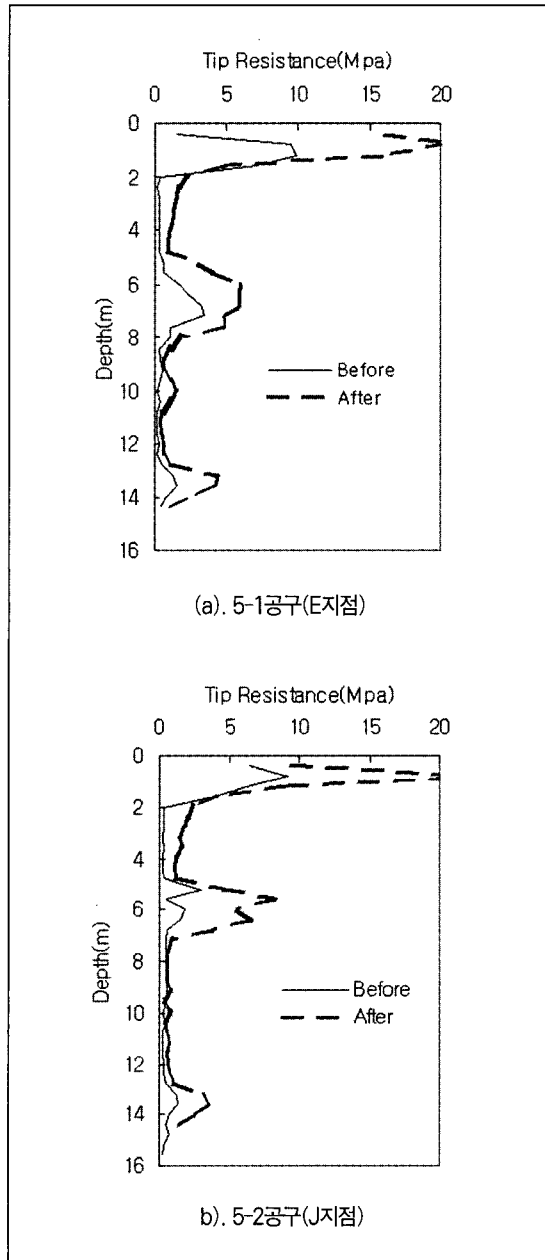


그림 18. 대표적인 Piezocone 시험 결과

$\Delta s_v / \Delta \sigma'_o$ 값은 제안된 콘계수에 따라 다소 차이가 나는 경향을 보이고 있으나 이선재(1997)가 제안한

콘계수 $N_{kt}=10$ 을 사용하여 산정한 비배수 전단강도 증가율은 0.19~0.64로 매우 분산폭이 크게 나타났으며, 평균값은 대략 0.38정도로 현장베인시험 결과와 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

또한, 현장시험 결과를 이용하여 통계 처리결과 현장베인시험으로 나타난 $\Delta s_v / \Delta \sigma'_o$ 의 모평균 90% 신뢰구간은 식(2)와 같고, Piezocone 관입시험 결과는 t분포를 근거로 한 모평균 90% 신뢰구간은 식(3)과 같은 결과를 얻었다.

$$(\Delta s_v / \Delta \sigma'_o)_{\text{fieldvane}} = 0.38 \pm 0.11 \quad (2)$$

$$(\Delta s_v / \Delta \sigma'_o)_{\text{cptu}} = 0.38 \pm 0.09 \quad (3)$$

이와 같이 이 지역의 선행재하 전·후의 지반개량 효과를 확인하기 위해 실시한 현장베인시험과 Piezocone 시험 결과 비배수전단강도 도수 분포의 범위는 크게 차이가 나지 않으며 강도증가율 분포는 비교적 근사한 값을 보이고 있는 것을 알 수 있었다.

4.2.2 예측결과 분석

연약지반상의 성토 시공과정에서 발생하는 침하량을 파악하여 현재의 압밀도를 산정하는 것은 시공의 안전성, 경제성 등의 여러 측면에서 중요하다. 이에 따라 시간에 따른 침하경향을 분석하기 위해 제2활주로 구간에 설치된 대표적인 층별침하계에 의한 침하량 측정결과는 그림 19와 같다. 이 때 연직배수재는 S.D를 타설하였으며, Preloading 높이는 5.5m(E.L:9.87m)일 때 압밀도 95.5%, 잔류침하량 2.1cm를 보이며, 각 층별 침하 양상은 비교적 뚜렷이 나타났으며, 실측치와 예측치는 비교적 신뢰성이 높았다. 이 때 예측에 사용된 방법은 쌍곡선법이다.

한편, 현장에서 장래침하량 예측방법으로서 주로 사용하는 방법으로는 쌍곡선법(Hyperbolic), 직선법(Asaoka), \sqrt{t} 법(Hoshino) 등이 있으며 본 현장의 경우는 쌍곡선법을 적용하였다.

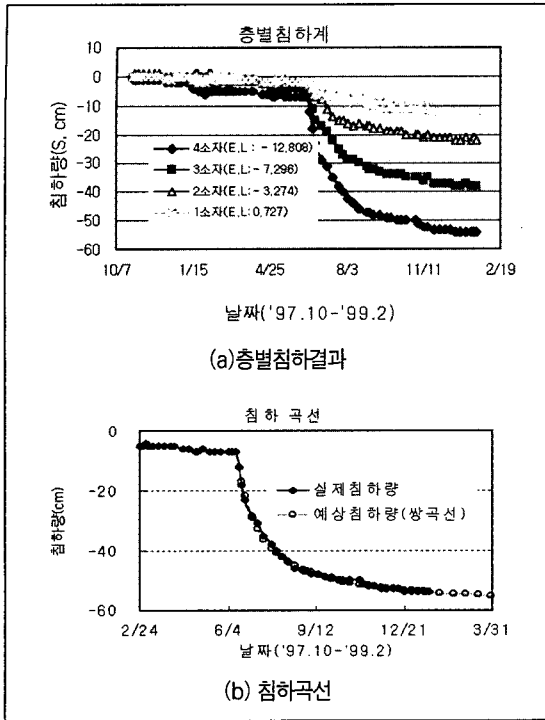


그림 19. 대표적인 증별침하계 계측 결과(MB-16)

표 5. 장래 침하량 산정방법에 따른 오차

오차	20% 이내	10% 이내	5% 이내
산정방법			
Hyperbolic	$U' = 0.6$	$U' = 0.7$	$U' = 0.8$
Asaoka	$U' = 0.65$	$U' = 0.8$	$U' = 0.9$
Hoshino	$U' = 0.5$	$U' = 0.6$	$U' = 0.7$

표 5와 같이 쌍곡선법과 직선법은 실제 침하량과 약 10%내의 오차를 나타내고 있어 두 방법 모두 실제 침하량과 매우 근사한 값을 예측 할 수 있으며, 장기간에 걸쳐 발생하는 2차 압밀 침하량을 감안할 경우, 다소 크게 침하량이 예측되는 쌍곡선법이 비교적 적절하였다. 그러나 산정결과는 산정방법, 침하형태에 따라 달라질 수 있으므로 쌍곡선법과 더불어 보조방법으로 직선법이나 \sqrt{t} 법을 활용하였다.

여기서 쌍곡선법은 침하의 평균속도는 쌍곡선적으로 감소한다는 가정하에 초기의 실측침하량으로부터 장래침하량을 예측하는 방법이고, 직선법은 1차원

압밀방정식에 의거 하중이 일정할 때의 침하량을 나타내는 간편식을 유한차분법으로 나타내었으며, \sqrt{t} 법은 재하시간과 함께 증가하는 침하량은 시간의 평방근에 비례한다는 기본원리에서 장래침하량을 추정하는 방법이다. 그림 20은 증별침하계의 계측결과에 대해 쌍곡선법을 이용하여 침하예측을 실시한 예로서, 압밀도 98%일 때의 예상침하량과 실측침하량의 상관도(R_c)가 0.998로 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

한편, 광활한 연약지반 부지의 경우 준설매립 이후에 수행되어진 재하성토로 원호활동이 일어날 경우 S.D 및 Sand Mat의 절단이 예상되므로 본 공사 부지내의 평균 연약층(N(5) 깊이 5.0m에 프리로딩(P.L)높이를 4.0, 5.0, 6.0m로 재하하는 경우에 대한 안정성 검토결과 그림 21과 같았다.

여기서, 적정 재하성토에 의한 한계성토고를 고려

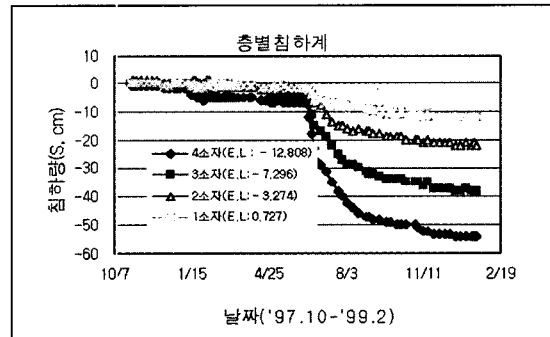


그림 20. 쌍곡선법 침하해석(MB-16)

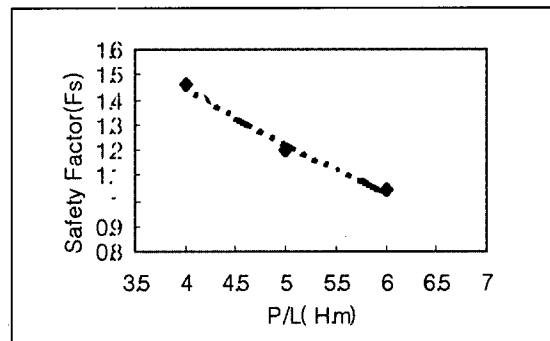


그림 21. Preloading(P/L)에 따른 최소 안전율(Fs)

하여 지반의 안정성을 평가하고 안전한 시공이 이루어지도록 하기 위하여 시공중 기준 안전율(F_s)=1.1을 만족하는 한계성토고를 약 5.6m로 적용하였다.

4.3 압밀계수와 Rebound 비

압밀계수와 압축지수의 산정이나 2차압밀 산정을 위한 재압축지수 등은 압밀도산정과 Vertical Drain 공법 결정시 대단히 중요한 요소이다. 이 중 압밀계수와 Rebound 산정의 어려움과 불확실성으로 인해 정밀도를 높이고자 실내의 시험결과를 비교 분석하였다. 이를 위해 현장침하 실측자료와 실내시험결과를 비교 평가하기 위해 지반정수를 역산하였으며, 역산방법으로는 실내시험에 의한 방법, 곡선적합 모사기법, Asaoka(1978) 및 Hansbo(1981)에 의한 방법 등이 있다. 이들 제안 방법을 간략하게 언급하면 곡선 적합모사기법은 실측 결과로부터 시간-침하량 곡선을 중첩하여 평면상에 그린 다음 실제 침하량곡선과 비교해 가면서 가장 근접된 이론 침하곡선을 선택하는 경험적인 방법이고, Asaoka방법은 Mikasa(1963)에 의해 유도된 압밀방정식을 이용하여 최종 침하량을 산정하는 방법이며, Hansbo방법은 배수재 설치시 발생하는 교란효과와 배수재 고유의 통수저항을 고려하여 산정하는 방법이다. 이와 같이 여러방법을 이용하여 현장 각 지역에서 실측한 자료를 근거로 압밀계수를 선정하였으며, 이들의 평균값과 설계 실내압밀계수를 비교하여 그림 22와 같이 나타내었다.

그림 22에 나타난 바와 같이 실측자료를 이용한 곡선적합 모사법이나 Asaoka법으로 구한 압밀계수 값은 유사한 경향을 보이며, 이 값은 실내 표준압밀 시험($\phi 60\text{mm}$, $H:20\text{mm}$)으로부터 산정된 압밀계수에 비해 약 1.5~3배정도 큰 값을 나타내고 있다. 또한, 지표침하량을 이용하여 역산한 압밀계수값은 그림 23과 같이 배수재(S.D) 설치간격에 따라 현장 압밀계수값 차는 크게 나타났다.

한편 실내 수직압밀계수와 현장 수평압밀계수의

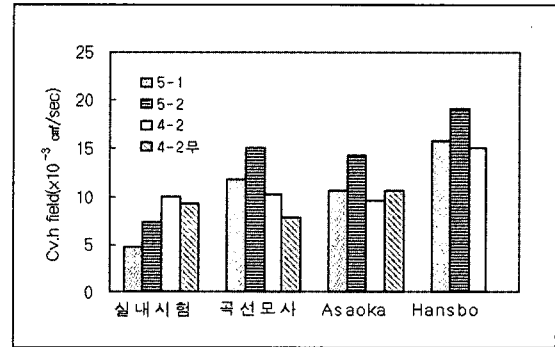


그림 22. 실내 및 현장 압밀계수 비교

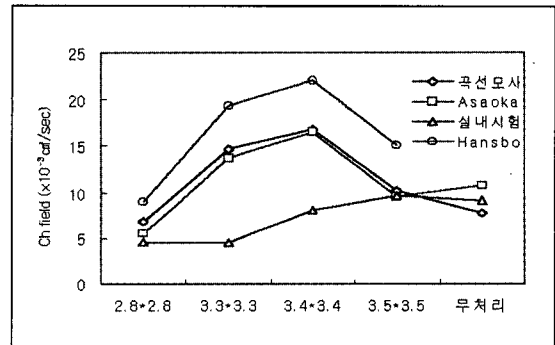


그림 23. 배수재 설치간격별 현장 압밀계수 비교

비($C_{h, \text{field}}/C_{v, \text{lab}}$)는 1.5~4배 정도로 나타나 설계에 적용한 압밀계수는 과소 평가되었음을 알 수 있다. 따라서 연약지반 설계시 지반개량공사 기간 산정은 압밀계수가 가장 큰 영향을 미치므로 배수조건, 압밀계수 및 응력변화, 배수재의 설치간격 및 지반층 내에 Sand Seam 존재 등과 같은 요인 등 보다 많은 지반조사와 세심한 평가방법을 동원하여 지반정수 산정의 주의를 요한다.

압밀은 하중이 재하(Loading)되면 시간에 의존하여 침하가 발생하나, 하중이 제하(Unloading)되면 일정량의 팽창(Swelling)이 발생하게 되는데 이를 지반침하 해석시 Rebound라고 한다. Rebound에 대한 연약층의 하중-변위특성은 실내압밀시험을 실시하여 그 특성을 평가하게 되며 이를 팽창지수 C_r (Swelling Index)로 나타내고, 보통 C_r 값은 압축지수(C_c)의 5%~10%를 취한다. Leonard(1976)의

표 6. 공구별 실내시험에 의한 압밀 정수

구분		4-2 공구	5-1 공구	5-2 공구
C _i design	-	0.228	0.200	0.244
C _v design		0.029	0.028	0.026
C _i /C _v	%	13	14	11

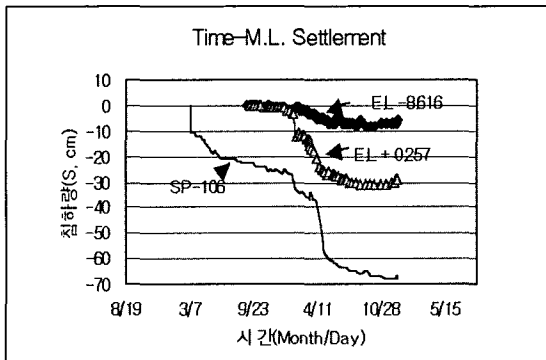


그림 24. 층별침하계의 Rebound측정(MS-106)

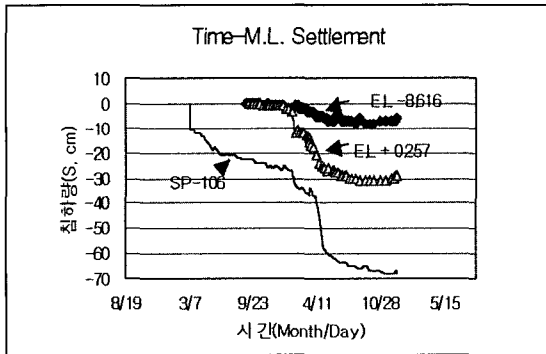


그림 25. 실내 및 실측의 Rebound량 비교

조사에 의하면 이 값은 0.015~0.035사이에서 변화된다고 제안하고 있다(김상규, 1995). 또한 Rebound 특성값을 찾고자 각 공구별로 측정된 실내 압밀시험결과를 보면 Rebound(C_i/C_v)비는 표 6과 같다.

한편 현장에서 성토제하에 따른 Rebound특성을 파악하고자 층별 침하계를 설치한 대표지점 9개소의 실측값은 4-2 공구는 4.8~16.3%, 5-1은 2.6~12.9%, 5-2는 8.6~9.7%로 나타났으며, 이 중 대표적인 층별침하계에 대한 Rebound 경향은 그림 24와 같다.

그림 25는 실내에서 Rowe cell 압밀시험으로 부터 얻은 압축지수(C_v)와 팽창지수(C_i)를 근거로 산정한 Rebound비와 현장 층별 침하계로부터 얻은 Rebound비를 비교하여 나타낸 결과이다. 그림 24, 그림 25에서 알 수 있듯이, 본 현장 C_i/C_v는 11~14%이었으며, 현장 실측 Rebound비는 실내시험으로부터 구한 Rebound비 보다 약간 작은 것으로 나타났다.

5. 장기계측에 의한 침하관리

일반적으로 연약지반에서 발생하는 압밀침하형태는 1차압밀뿐만 아니라 2차압밀이 발생하고, 대형 동하중과 지층조건의 불확실성 등에 의거 지속적으로 침하가 발생하므로 구조물의 종류와 등급에 따라 유지관리 차원에서 장기계측이 필요하다. 이에 대해 본 현장과 같이 대형 건설현장일 뿐만아니라 공사의 중요성에 의거 유지관리 계측을 실시하고자 하며, 일본 간사이공항과 이태리 로마 FIUMICINO공항(1998)등의 대형공항에서도 장기적인 침하관리 및 유지관리 대책으로 장기 계측시스템이 운영되고 있다.

그림 26은 하중제하(Unloading)로 인한 팽창(Swelling)에 의한 Rebound의 경향을 나타낸 것으로서 본 공항건설 부지의 경우 하중제하(Unloading)로

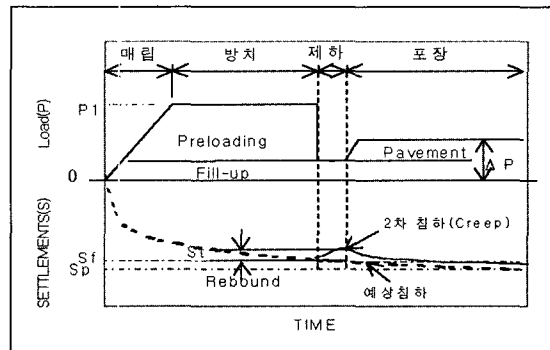


그림 26. Preloading 제하에 의한 Rebound 경향

잔존 잔류침하량, Rebound량 및 2차 압밀침하에 대한 장기 크리프 변형등 공용 후 계속해 발생하는 장기침하량의 추정을 위해 장기 계측기에 의한 침하판리가 필요하다. 이에 따라 공항지역 침하는 지반침하가 연간 수 밀리미터(mm)의 정확도가 요구되므로 정밀도, 정확성 및 내구성을 감안하여 활주로, 유도로, 계류장 등은 포장공사전 장기계측을 위해 지표면침하판(17개소), 층별 침하계(9개소) 및 지하수위계(7개소)를 추가로 매설하고 자동계측을 실시하였다.

6. 결론

인천국제공항 주요 토목구조물의 연약지반 개량을 위해 시험시공 결과와 본 공사에 적용한 연약지반처리공법과 계측결과를 분석하여 수행한 연약지반개량 연구결과는 다음과 같다.

1. 본시공을 위해 적용가능한 Vertical Drain 공법인 Sand Drain(S.D), Plastic Board Drain(P.B.D), Pack Drain, 및 Sand Compaction Pile(S.C.P)공법의 시험시공 결과, 제반 공법의 압밀침하 거동은 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이는 공법별로 연직배수재 타설시 교란효과, Well 저항이 비슷하며, 또한 지층의 샌드심(Sand Seam) 발달로 압밀축진이 빠르게 진행되어 공법별 침하양상이 큰 차이를 보이지 않는 것으로 판단된다. 이에 따라 배수재 성능, 경제성, 시공성 등에 의해 S.D공법 및 PBD공법이 가장 유리한 공법으로 평가되었으며, 상부해성층의 두께가 평균 6m 이하로서 샌드심(Sand Seam)이 존재하는 구간에는 연직배수재를 타설하지 않고 Preloading만으로 지반개량이 가능한 것으로 나타났다.
2. 지반개량 평가는 사후 확인조사와 계측에 따른

압밀도 등으로부터 결정하였으며, 사후 확인조사는 실내 삼축시험과 현장 배인시험과 피에조콘시험을 실시하였다. 이들 결과로부터 산정한 비배수 전단강도 증가율은 개략적으로 0.38인 것으로 나타났으며, 서로 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

3. 실측된 침하량은 최종예측 방법인 Asaoka 와 Hoshino 방법에 비하여 다소 크게 발생하는 것으로 나타났으며, 예측방법은 쌍곡선법이 비교적 적정한 것으로 분석되었고, 성토 제하시기 결정은 계측결과로부터 측정된 압밀도와 허용 잔류침하량 등을 모두 만족하고 과잉간극수압이 소산되어 수렴이 만족하는 경우에 지반개량이 완료된 것으로 판단하였다.
4. 설계시 적용한 압밀계수와 실측 압밀계수 비교 결과 대체로 유사한 경향을 보이나, 일부 원지반 압밀계수는 교란정도와 배수재의 설치간격에 따라 실내압밀계수가 과소 평가된 것으로 나타났다.
5. 설계에 적용된 Rebound 비는 성토제하에 따른 실측 Rebound량과 지역에 따라 다소 차이는 있으나 유사한 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. 신공항건설공단(1992), "수도권 신국제공항 부지조성공사 지반조사 보고서"
2. (주)유신설계공단(1994), "수도권 신공항 부지조성공사 4, 5공구 지반개량 검토보고서"
3. 신공항건설공단(1995), "수도권 신국제공항 부지조성공사 시험시공 관리용역 종합보고서"
4. 김상규(1995), 토질역학, 청문각, pp. 117-148.
5. 신공항건설공단(1997), "수도권 신공항 시험시공 관리용역 보고서"
6. 이선재(1997), "피에조콘을 이용한 국내지반의 공학적

- 특성 연구" 서울대학교 박사학위 논문
7. 이갑열(1998), " 현장시험을 통한 비배수 전단강도 평가" 서울대학교 석사학위 논문
 8. 김종국, 성기광, 김학중, 김영웅(2000), "인천국제공항 지역의 피에조콘조사와 결과의 적용" 한국지반공학회 논문집 제16권 제2호 pp. 115~123
 9. Asaoka, A(1978), "Observational Procedure of Settlement Prediction", Soils and Foundations No.3, pp87-101
 10. Hansbo, S(1981), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Prefabricated Drains", Proc.10th Int. Conf. Soil Mech. Eng. Stockholm, Vol.3, Paper12/22
 11. 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", Canadian, Geotech.J.15, pp.54-65
 12. A.S Balasbranium and R.P.Brenner(1981), "Consolidation and Settlement of Soft Clay", SOFT CLAY ENGINEERING, Elsevier, pp.480-566
 13. V. Choa, G.P.Karunarathe, S.D.Ramaswamy, A. Vijiaratnam and S.L.Lee(1981), " Drain Performance in Changi Marine Clay", 10th IC-SMFE, Stockholm, Vol.3
 14. T. Akagi(1981), "Effects of Mandrel-Driven Sand Drains on Soft Clay", 10th ICSMFE, Stockholm, Vol.3, pp.581-584
 15. 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
 16. D.C Koutsoftas, P.K.H.Cheung(1994), "Consolidation Settlements and Pore Pressure Dissipation", Geotech, Special Pub.NO.40, ASCE, Vol.2-1
 17. Bjerrum.L.(1972), "Embankments on Soft Ground". State of the Art Report, Proc. ASCE Special Conference on Performance of Earth and Earth Supported Structures, Lafayette, Vol.2, pp.1-54
 18. 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", No.40, ASCE, Vol.2-1, pp1164-1175

한국지반공학회 논문집 정기구독 신청 안내

회원 여러분의 안위를 기원합니다.

1999년 1월부터 우리학회의 간행물이 학회지와 논문집으로 분리 발간되었습니다. 학회지는 매월 무가로 회원들께 배포되며, 논문집은 유가로 1년에 20,000원의 구독료를 납부하고 받아 보실 수 있습니다. 필요하신 회원은 다음 사항을 참고하셔서 논문집 구독 신청을 하시기 바랍니다.

다 음

- 구 독 료 : 1년 6회, 20,000원
- 신청기한 : 수시(단, 신청시점이 구독료 납부 회계시점임)
- 입 금 처 : 한국주택은행 (예금주: 한국지반공학회) 534637-01-002333

* 입금 후 반드시 학회 사무국(02-3474-4428, 7865)으로 연락하여 확인하시기 바랍니다.