

인천국제공항 토목시설공사를 위한 연약지반개량 시공사례 연구

최인걸¹, 고문수², 김영웅³, 김학중⁴

1. 서론

현재 세계 각국에서는 머지 않아 도래할 항공교통 중심시대에 대비하여 대규모 공항 건설을 추진 중에 있다. 이러한 시대 상황 속에서 21세기 동북아의 hub 공항을 목표로 건설되고 있는 인천국제공항은 여러 경쟁공항에 비하여 입지여건상 소음피해 저감, 국토의 효율적 이용, 저렴한 건설비용 등 매우 유리한 조건을 갖고 있다. 특히, 인천 앞바다에 위치한 국제적인 해상공항으로서 환경적인 면에서 지역사회와 공존하고 함께 발전할 수 있으며 또한 세계의 항공여객 수요 증가 추세, 항공기의 초음속·초대형화로 미래 항공산업의 변화 패턴에 요구하는 국제 공항의 흐름에 따라 공항시설이 충분히 확보되어 있는 장점을 지니고 있다.

인천국제공항의 공항토목시설공사 시공순서를 살펴보면 영종도와 용유도 섬 사이의 간석지를 7.3km 연장의 북측방조제, 6.9km 연장의 남측방조제, 3.1km 연장의 동측방조제를 시공하면서 동시에 12,000~20,000Hp의 펌프준설선을 이용하여 방조제 외측 해저에서 준설한 모래를 공항지역내에 매립하였다. 준설매립 완료후에는 개항시 준설매립하중, 포장하중, 항공기하중의 공용하중조건에서 침하가 예상되는 상부해성층(N5)을 대상으로 적정 지반개량공법을 선정하기 위하여 연약지반개량 시험시공을 실시하였

고 그 결과를 본공사에 적용하였다. 연약지반개량 완료후에는 느슨한 준설매립토의 액상화 방지 및 포장의 지지력을 확보하기 위하여 준설매립토를 대상으로 다짐시험시공을 실시하였고 그 결과를 본공사에 적용하였으며 동시에 지상조업차량을 위하여 활주로 하단에 시공되는 지하차도공사, GSE(Ground Service Equipment) 도로 하단에 시공되는 공동구 공사를 위하여 steel sheet pile을 이용한 가시설공사를 수행하였다. 또한 활주로, 계류장 등 포장공사를 위하여 포장공사 시험시공을 수행하였다. 아울러 연약지반개량공사 이후 지반개량이 적정하였는지를 판단하기 위하여 지반개량이 완료된 지층에 지표침하계, 층별침하계 등 장기계측기를 매설하여 관리중에 있다. 본 논문에서는 인천국제공항건설 사업현황과 지반조건 및 특성을 살펴보고, 지반침하안정을 위한 연약 점토지반의 지반개량과 준설매립층의 지반개량 시공 등 지반공학적 측면을 고려한 인천국제공항의 연약지반개량 시공사례를 기술하고자 하며, 기타 시공사례로 가시설, 공항포장, 공용이후 장기 침하계측관리 등을 간략하게 기술하고자 한다.

2. 인천국제공항 사업개요

지난 1992년 11월에 착공한 공항건설사업은 최종 완공단계인 2020년까지 단계별로 나누어 시행될 계획으로 있고 현재 추진하고 있는 1단계 주요 건설사업은 공중별로 2000년 6월~12월말에 완료되어 종합적인 시운전을 거쳐 2001년 3월말 경에 개항할 목표로 추진되고 있으며 공항사업규모는 표 1과 같다.

*1 정회원, (주)유신코퍼레이션
인천국제공항 공항토목시설공사감리단 기술본부장
*2 정회원, (주)유신코퍼레이션
인천국제공항 공항토목시설공사감리단 차장
*3 정회원, 인천국제공항공사 건설시험소 소장
*4 정회원, 인천국제공항공사 건설시험소 과장

표 1. 인천국제공항 사업 규모

구분		인천국제공항		김포공항
		1 단계	최종 단계	
단지 조성	부지면적 (배후지원단지)	421만평 355만평 (66만평)	1,435만평 (264만평)	214만평 -
항공 시설	활주로(m) (연간처리능력)	2개(3,750x60) (17만회/1개)	4개(3,750~4,200x60) (53만회)	2개(3,600x453,200x60) (19.5만회)
	여객터미널(만평) (연간처리능력)	10.8(357,000㎡) (2,700만명)	33.9(1,120,000㎡) (1억명)	-
	화물터미널(만평) (연간처리능력)	4.5(148,000㎡) (171만톤)	16.9(557,000㎡) (700만톤)	79,000㎡ (170만톤)
	항공보안시설	CAT-Ⅲa	CAT-Ⅲb	CAT-II
교통 시설	전용도로	6~8차선, 54.5km	8차선, 54.5km	-
	전용철도	용지매입	복선, 57.3km	-
사업기간		1992~2000	2020년까지	-

표 2. 국내·외 해상 지반조건 비교

구분	국내지반		해외 해상공항		
	인천 국제공항	광양 제철소	홍콩 공항	일본간사이공항	싱가폴창이공항
평균 수심 (m)	1	2	10	18	4
연약층두께 (m)	0~11.5	5~25	15~20	16~20	14~15
평균매립토량(㎡/㎡)	5.8	9.0	17.5	33.5	10.3

3. 연약점토지반 조건 및 특성과 준설매립지반의 공학적 특성 및 평가

3.1 연약점토지반 조건 및 특성

인천국제공항 부지의 지층은 퇴적층이 거의 동일한 한서·남해안 지층과는 달리 퇴적층이 매우 불규칙하므로 연약지반의 지층 지반정보를 보다 정밀하게 얻기 위하여 현장시험은 표준관입시험(SPT), 현장베인시험(Geonor Vane Test), 피에조콘관입시험(CPTu), 딜라토미터시험(DMT), 공내재하시험(PMT), 물리탐사 등을 실시하였다. 때로는 현장시험을 두 가지 시험이상으로 병행하여 조사하므로써 정밀한 지반조사 자료를 확보하였고, 해수부인 1,400만평은 전지역에 걸쳐 격자형 평균 72m간격으로 시추조사와 현장시험을 수행하였다. 이것은 지층구조

가 복잡한 지역에 대한 일반적인 조사 간격인 100~200m보다 세밀한 조사이다. 그리고 실내에서는 Rowe cell 및 자동화 진동삼축시험기 등의 최신의 시험장비를 이용하여 원지반의 압밀특성, 준설토의 액상화 발생 가능여부를 분석하였으며 실내시험결과를 현장시험결과와 비교 평가하여 지반물성치 선정에 대한 신뢰도를 제고하였다.

인천국제공항의 부지 1,700만평중 해수부 1,400만평은 표준관입시험 N<5 의 심도가 평균 5m(최대 11.5m)두께로 분포되어 있고 함수비는 30~50%이며 미세 입자로 구성된 해상점토층으로 형성되어 있다. 공항부지의 지반조건은 표 2.에서와 같이 해상 연약지반에 건설된 홍콩공항, 간사이공항, 창이공항 등의 연약층에 비해 비교적 양호한 지반조건을 갖추고 있다. 본 공항 부지는 자연상태의 간석지(갯벌) 위에 평균 5m두께로 준설토를 매립하여 지반을 조성하였

고, 1단계 공사 건설지역 421만평을 매립하는데 총 6,500만 m³의 토사가 사용되었으며, 이중 약 80%인 5,200만 m³를 인근해저의 모래를 준설하여 사용하였고, 나머지 물량은 항공기 운항의 장애 표고가 EL. 52.0m 이므로 이보다 높은 주변의 산을 절토하여 사용하였다.

3.2 연약 점토지반의 공학적 특성

인천국제공항 부지의 지층구분은 상부로부터 상부해성층, 상부충적층, 하부해성층, 하부충적층, 풍화잔류토 및 암반으로 구성되어 있으며 전형적인 지층 분포는 그림 1과 같다. 상부해성층은 부지 전역에 걸쳐 표준관입시험 N<5 의 심도가 평균 5m 층후로 분포되어 있고 매우 연약 내지 연약한 암갈색의 점토질 실트(ML) 또는 실트질 점토(CL)로 구성되어 있으며 자연함수비는 30~50% 정도이다.



그림1. 기초 지반 단면도



그림2. Sand seam

Rowe cell 압밀시험결과 과압밀비(OCR)는 1.0~1.3으로 부분적으로 과압밀된 상태이고 피에조콘(piezocone)조사에 의한 q_c값은 대부분 10kg/cm² 이하의 값을 보이고 있다. 특히 피에조콘 조사결과 연약층 사이에 sand seam이 그림 2와 같이 두께 5~20cm 두께로 일부 심도에 2~4개 정도 발달한 양상을 보여주고 있다. 상부충적층은 갈색의 실트질 모래(SM) 또는 실트질 점토(CL)로 구성되어 있으며, 표준관입시험 N치는 10~15의 분포를 보이고 있고 위치에 따라 본 지층이 나타나지 않는 지역도 있다. 하부해성층은 약 4~6m 층후로 구성되어 있고 N치는 6~10 정도이며 하부충적층은 CL, ML과 SM층으로 대부분 표준관입시험 N치가 20 이상으로 매우 조밀한 상태이다. 풍화잔류토층은 황갈색의 실트석인 모래(SM)로서 기반암인 화강암 및 흑운모편마암이 완전히 풍화되어 역학적 특성을 상실한 상태로 나타났다. 이와 같이 본 지역은 상부 연약층의 층후가 다른 지역에 비하여 비교적 두텁고 퇴적상태가 매우 불규칙하게 분포되어 있는 것이 특징이다. 특히, 연약한 점토지반의 일부구간에서는 sand seam이 다수 분포하고 있어 수평배수가 원활히 이루어져 압밀을 촉진시킨 것으로 판단되었으며, 압밀이 당초 실내시험 결과로 예상한 것보다 상당히 빠르게 진행되었다. 또한 점토의 투수계수는 $\alpha \times 10^{-5-7}$ cm/sec인데 비해 sand seam의 투수계수는 $\alpha \times 10^{-3}$ cm/sec이므로 sand seam의 투수성은 점토에 비해 약 100배의 투수성을 가진 것으로 나타났으며 인천국제공항과 외국공항의 지반특성 비교는 표 3과 같다.

3.3 준설매립지반의 공학적 특성 및 평가

본 공항 부지는 전술한 바와 같이 펌프준설선을 이용하여 평균 5m 두께로 준설토를 매립하여 부지를 조성하였는데 주변해상의 모래와 해수를 동시에 흡입하여 배사관을 통하여 준설매립하는 방식은 물과 토사의 혼합유체 속에서 토사를 침강/퇴적시켜 새로운 지반을 형성하는 것으로서, 형성된 지반은 퇴

표 3. 인천국제공항과 외국 경쟁공항의 지반특성 비교

구 분	인천국제공항	일본간사이공항	홍콩첵렘콕공항	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
압축 지수	0.233	0.6 ~ 0.8	1.0	0.75 ~ 1.45
압밀계수(cm ² /sec)	(3~5) × 10 ³	(1) × 10 ³	(1~1.5) × 10 ³	(1~1.9) × 10 ³
비배수강도(kg/cm ²)	0.10~0.25	0.025	0.05~0.25	-

적시의 환경에 따라 매우 다양한 특성을 나타낸다. 이때 토립자의 침강/퇴적이 수중에서 이루어지므로 토립자의 낙하에너지가 작아지게 되어 느슨한 상태의 연약지반을 형성할 가능성이 크다. 또한 동일위치에서는 퇴적환경이 동일하므로 유사한 입경의 입자가 침강/퇴적되어 빈입도(poorly graded)의 지반이 형성되기 쉽다. 활주로, 계류장등 포장하부의 준설매립토 품질관리는 #200번체 통과량이 노상(2m)의 경우 15%이하, 노체(약 3m)의 경우 25% 이하가 되도록 관리하였으며, 대상 하층이 항공기 하층이므로 준설매립토는 항공기에 대한 포장설계의 요구조건을 만족할 수 있을 정도의 개량효과를 달성할 수 있어야 한다. 준설매립토의 특성을 살펴보면 표4와 같다.

표4. 준설매립토 특성

항 목	범 위	비 고
함수비(%)	4.7~24.4	
비 중	2.65~2.66	
#200번체 통과량(%)	7.0~10.1	
균등계수	1.5~3.0	
γ_{dmax} (kg/cm ³)	1.78~1.80	수정 다짐(D다짐) 기준
최적함수비(%)	14.8~15.4	수정 다짐(D다짐) 기준
실내 CBR	19.1~22.5	수정다짐의 다짐도 95% 기준
분 류	SP-SM	
다짐지수(F)*	0.6~0.7	Hilf(1991)로부터 추정

* : $F = (e_{max} - e_{min}) / e_{min}$
 (e_{max} : 가장 느슨한 상태의 흙의 간극비, e_{min} : 가장 조밀한 상태의 흙의 간극비)로 대개 $F=0.56\sim 2.3$ 의 범위를 가지며 F가 작을 수록 다짐이 곤란

표 4에서와 같이 준설매립토의 다짐지수(compactibility)는 0.6~0.7의 범위로서 일반 정적 방법으로는 다짐이 곤란한 것으로 평가되었으며, 본 느슨한 사질지반의 준설매립토에 대한 지반개량은 세립분 함유량이 비교적 적은 조립/빈입도의 지반이 주요 대상이었다.

4. 연약 점성토에 대한 지반개량

4.1 설계개요

연약지반상에 건설되는 인천국제공항의 활주로, 유도로, 계류장 등 공항토목시설물은 침하, 활동, 지지력 등에 대해 안전하여야 하므로 공항부지에 대한 소정의 지반강도를 확보하고자 그림 3과 같은 설계하중 조건으로 연약지반 개량을 하지 않는 경우에 대한 압밀침하량을 계산한 결과 상부해성층은 14~56 cm 정도로 허용잔류침하량기준(활주로: 상부 2.5cm, 유도로 및 계류장: 5cm)을 초과하나, 하부해성층은 과압밀($OCR=1.5\sim 2.2$)된 상태이므로 허용잔류침하량(활주로, 유도로 및 계류장: 5cm)이내에 있었다. 따라서 연약지반 개량대상은 표준관입시험의 $N(5$ 심도(상부해성층)까지로 선정하였으며, 연직배수제 타설후 개항후 공용하중보다 1.2~1.5배 큰 선행하중

P 항공기 최대 속하중(P)=114.3ton		
포장 F.L.		
포장 $\gamma_{11}=2.4t/m^3$ (CRC)	$T_1=0.95m$ (CRC)	T1
$\gamma_{12}=2.1t/m^3$ (ASP.)	$T_1=1.05m$ (ASP.) 환주르, 유도로 0.95m	
노상 $\gamma_{12}=1.9t/m^3$	$T_2=2.0m$	T2
노체 $\gamma_{13}=1.8t/m^3$	$T_3=VAR.$	T3
$\gamma_{sub}=0.8t/m^3$		D
SOFT LAYER $\rightarrow \Delta P \cdot P_0$		
ΔP (하중) = $(P/Z^2) \cdot L_2 \cdot \gamma_{11} \cdot T_1 + \gamma_{12} \cdot T_2 + \gamma_{13} \cdot T_3$		
P_0 (지중응력) = $\gamma_{sub} \cdot (D/2)$		
SOFT LAYER		

그림3. 설계하중조건

표 5. 주요공종별 연약지반처리 설계내용

공종	배수재 간격	P/L높이	허용잔류침하량
활주로	S.D $\phi 400$ 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	하부해성층5.0cm)
유도로	S.D $\phi 400$ 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	하부해성층5.0cm)
계류장	S.D $\phi 400$ 3.0×3.0~ 3.5×3.5m	4.6~5.4m	10.0cm (상부해성층5.0cm+ 하부해성층5.0cm)

(preloading, P/L)으로 약 6개월 동안 재하하였다. 공항 주요 공종별 연약지반 처리 설계내용은 표 5와 같다.

4.2 시험시공

연약지반개량 공법선정을 위한 시험시공은 전체부지를 대표할 수 있는 지점을 선정하였으며 적용공법은 Sand Drain, Plastic Board Drain, Pack Drain, Sand Compaction Pile 및 단순 프리로딩공법이다. 시험시공은 연직배수재와 프리로딩을 함께 적용한 구간(84m×360m)과 sand mat의 효용성을 평가하기

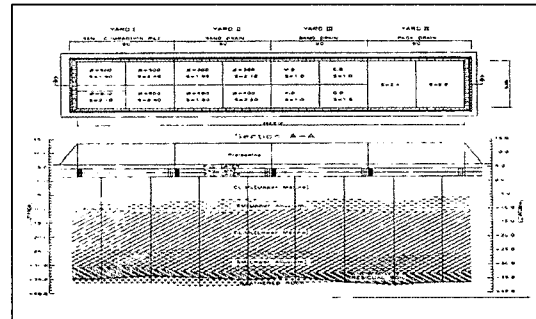


그림 4. 수직배수재 시험시공계획 및 지층구성도

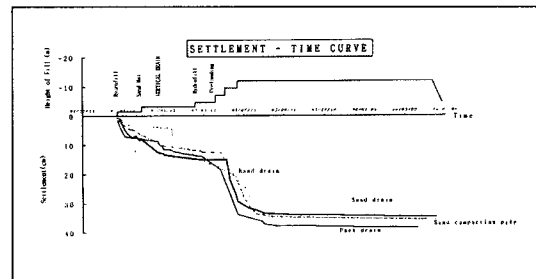


그림 5. 시험시공시 지반개량공법별 침하특성 비교

위해 단순 프리로딩만 적용한 구간(84m×180m)으로 분리하여 시행하였다.

15개월 동안 시험시공 구간의 지반침하 및 간극수압을 측정한 결과 연직배수재 타설지역에서 측정된 1차 압밀거동은 그림 5와 같이 시간-침하곡선의 기울기 또는 곡률은 공법별로 명확히 구분할 수 없을 정도로 압밀촉진효과가 유사한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 공법별 연직배수재 타설시 발생한 웰저항(well resistance), 응력집중(arching effect), 교란효과(smear effect) 등의 영향이 비슷하고 특히 지층에 sand seam의 존재로 인하여 압밀이 빠르게 촉진되어 공법별 침하양상이 비슷한 것으로 판단된다. 측정된 침하에 대한 역해석 결과 N<5의 연약층 깊이가 6m 이상인 경우나 sand seam의 연속성이 불량한 경우 연직배수재가 필요한 것으로 나타났으며, 최적 연직배수재 공법으로는 경제성에서 유리한 Sand Drain, Plastic Board Drain공법으로 결정되었다.

4.3 연약지반개량 효과분석

4.3.1 시공관리

연약지반개량공사 시공절차는 시험시공 과정 및 결과를 고려하여 다음과 같은 순서로 실시하였으며 토목시설공사중 주요공종인 활주로의 연약지반개량 단면도는 그림 6과 같다.

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

활주로, 유도로, 계류장의 허용잔류침하량 설계기준치(상부 및 하부해성층)는 표5와 같이 각각 7.5cm, 10cm, 10cm이므로 지반개량을 하기 위하여 재하한 프리로딩 제거시 계측에 의한 잔류침하량이 기준치 이내인 경우 제거해야 하지만 공항지역의 퇴적층이 매우 불규칙하고 또한 향후 하부해성층의 2차 압밀침하가 우려되어 상·하부 해성층을 포함한 잔류침하량이 계측분석결과 활주로는 2.5cm, 유도로 및 계류장은 5.0cm 이내인 경우에만 프리로딩을 제거하였으므로 포장공사 완료후 항공기 하중이 작용한다 하더라도 지반변위는 극히 미미하도록 안정적으로 지반개량을 실시하였다.

4.3.2 연약지반 개량확인

(1) 계측관리

본공사에서는 준설매립 시공시, 프리로딩 재하시

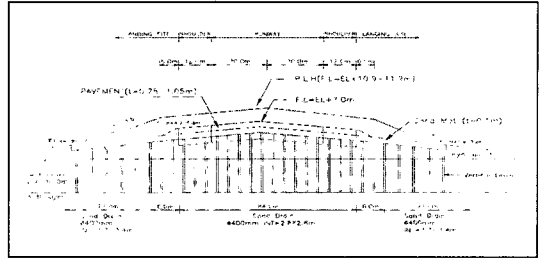


그림 6. 연약지반개량 단면도

연약지반거동을 분석하기 위하여 원지반 위에 지표면침하판을 100m 간격으로 설치하였고, 해성층과 충적층 사이에는 층별침하계를 매설하고, 각 층의 중앙지점에는 상재하중에 따른 과잉간극수압의 분포를 파악하기 위해 간극수압계를 매설하였으며, 지하수위의 변화와 성토사면의 거동을 살펴보기 위해 지하수위계 및 경사계를 200m 간격으로 설치하였다. 계측빈도는 준설매립중에 2일 1회, 성토시공중~성토후 1개월간은 1일 1회, 이후 1~2개월은 3일 1회, 3~4개월은 1주 1회, 4개월 이후에는 2주 1회로 시행하였다.

잔류침하량 추정시 현장에서 계측된 값을 쌍곡선법, 아사오카법, 호시노방법으로 분석한 결과 대체로 쌍곡선법이 타 방법에 비하여 잔류침하량이 크게 나타나는 경향을 보였다. 따라서 쌍곡선법을 시공관리에 적용할 경우 프리로딩 제거시기가 지연될 수 있으나 지층의 불균일성 등을 감안할 경우 타 방법에 비하여 안정적인 결과를 얻을 수 있으므로 재하된 프리로딩을 제거할 경우 이 방법을 주로 적용하였다.

(2) 개량전후의 토질정수 변화

연약지반처리 대상지역에서 실시된 사전 및 사후조사 결과에 의하면 그림 7과 같이 자연함수비(Wn)와 간극비(e)는 다소 감소하는 경향을 보이고 있고, 일축강도는 뚜렷이 증가하는 것을 알 수 있었다. 초기 함수비와 초기 간극비로부터의 이론적인 변화량은 대략 10% 정도로 예상하였으나, 실측치의 변화량은 5~10% 정도로 비슷하거나 소폭으로 감소한 것을 알 수 있었다.

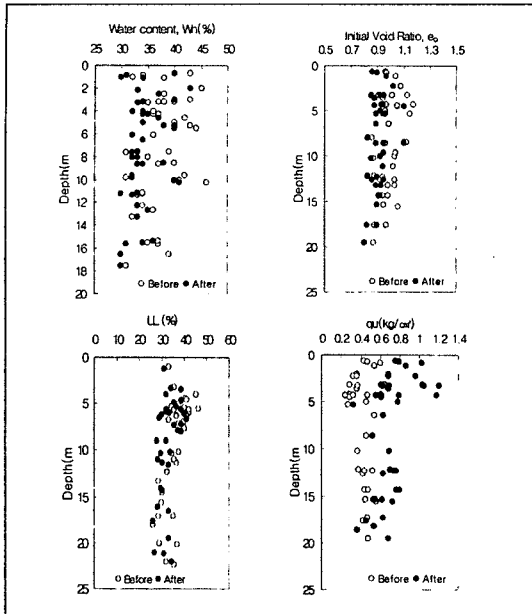


그림 7. 선행재하 전·후의 토질정수 변화

(3) 비배수 전단강도 증가

삼축압축시험(UU), 현장배인시험, 피에조콘시험 결과 등을 통해 연약지반 개량전후의 비배수전단강도 증가율을 분석한 결과는 다음 표 6 및 그림 8 과 같다.

표 6. 비배수전단강도 증가분 ($\Delta Su/\Delta \sigma'0$) 비교

시험종류	$\Delta Su/\Delta \sigma'0$ 분포	t 분포도에 의한 모평균 90% 신뢰구간
삼축압축(UU)시험	0.01~0.62	0.19 ± 0.04
Geonor Vane Test	0.07~0.76	0.38 ± 0.11
CPT	0.19~0.64	0.38 ± 0.09

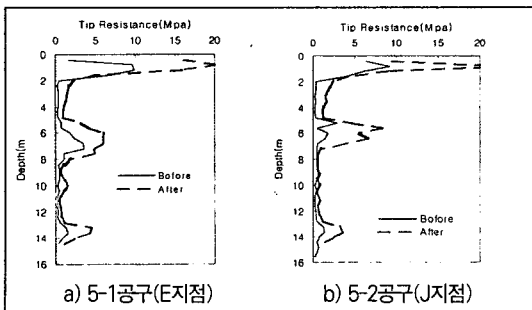


그림 8. 피에조콘시험 결과

표 6에 나타난 바와 같이 비배수전단강도 증가율의 분포가 매우 광범위한 것은 본 지역의 연약층 심도가 불규칙함에 따라 프리로딩 하중에 의한 전단강도 증가율이 불규칙했기 때문으로 분석된다. t분포(W.S. Gosset)를 사용한 모평균 90% 신뢰구간을 산정해 보면 현장배인시험과 피에조콘시험 결과간에 비배수전단강도 도수분포의 범위가 크게 차이가 나지 않으며 강도증가율의 분포도 비교적 근사한 값을 보이고 있음을 알 수 있었다. 한편, 삼축압축(UU)시험에 의한 비배수전단강도 증가율이 다른 두 시험에 의한 결과보다 작게 나타난 것은 시료채취, 성형 및 실내시험과정에서 시료가 교란되었기 때문인 것으로 판단된다.

4.4 침하특성

(1) 침하경향

현장 실측침하량에 의해 산정한 압밀도와 잔류침하량 하방 등을 분석한 결과 현장에 설치된 지표침하계의 실측침하량 산정결과는 압밀도 95%이상일 때 잔류침하량은 대략 0.4~2.1cm 이하로 평가되었다. 이와 더불어 활주로 구간 64개소에서 얻은 지표침하계의 실측 침하량으로 산정한 압밀도와 잔류침하량과의 관계는 그림 9와 같다. 이들 상호관계는 다음 식 1과 같이 나타났고 이 때의 압밀도는 95%, 잔류침하량은 2.8cm로 나타났다. 또한 계측결과에 의한 장래침하량 산정방법에 따른 오차는 표 7과 같이 나타났다.

$$Sr = -0.48 \times U + 48.4 \quad (R^2 = 0.91) \quad \text{---(식 1)}$$

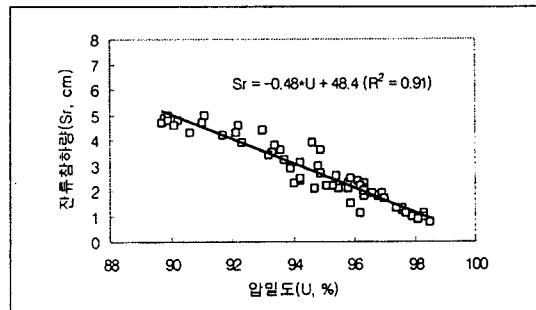


그림 9. 압밀도(U)와 잔류침하량(Sr) 관계

표 7. 장래침하량 산정방법에 따른 오차

오차 산정방법	20%이내	10%이내	5%이내
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

(2) 실측침하에 의한 압밀계수 해석

실내시험결과에 의해 설계시 적용한 압밀계수의 타당성을 평가하기 위해 현장 침하실측자료를 이용하여 곡선적합 모사기법, Asaoka(1978) 및 Hansbo(1981) 등에 의한 방법으로 압밀계수를 역산하여 실내압밀계수와 비교한 결과 배수재의 타설 위치 및 설치간격에 따라 현장압밀계수가 대체로 크게 나타나($C_h \text{ field}/C_v \text{ lab.} = 1.5 \sim 4$) 설계시 적용된 실내압밀계수가 과소 평가되고 있음을 알 수 있었다.

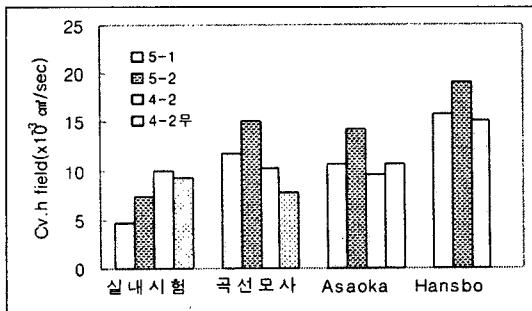


그림 10. 실내 및 현장압밀계수 비교

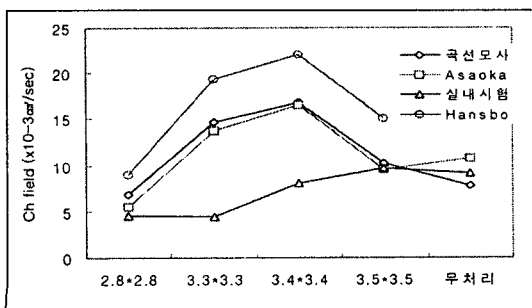


그림 11. 배수재 설치간격별 현장압밀계수 비교

(3) Rebound 특성

프리로딩 제거시 지반의 rebound 경향을 분석한 결과는 표 8, 그림 12 및 그림 13과 같다.

표 8. 실내시험결과에 의한 설계압밀정수

구분	4-2 공구	5-1 공구	5-2 공구
Cc design	0.228	0.200	0.244
Cr design	0.029	0.028	0.026
Cr/Cc	13 %	14 %	11 %

프리로딩 제거시 전침하량에 대한 rebound는 공구별로 층별 침하계의 대표 지점 9개소를 선정하여 얻은 실측결과, 4-2공구는 4.8~16.3%, 5-1은 2.6~12.9%, 5-2는 8.6~9.7%로 대체로 10% 내외이며, 이중 대표적인 층별침하계에 대한 프리로딩 제거후 rebound 경향은 그림 12와 같다.

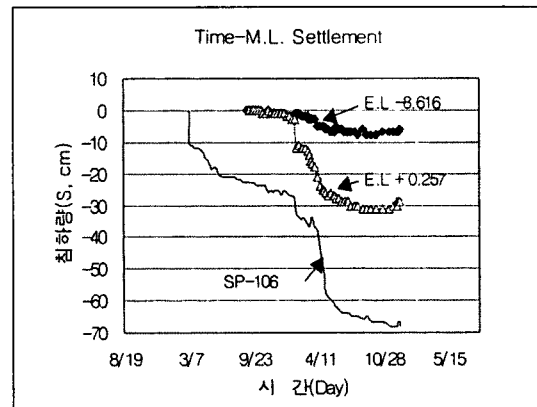


그림 12. 층별침하계의 rebound 측정결과

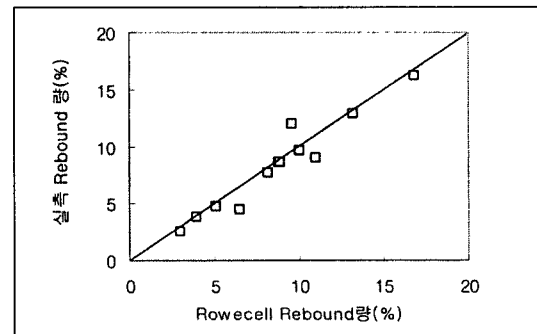


그림 13. 실내시험 및 실측 rebound량 비교

그림 13은 실내에서 Rowe cell압밀시험에 의해 구한 압축지수(Cc)와 재압축지수(Cr)를 근거로 산정한 rebound량과 층별침하계로 측정된 rebound량을 비교하였는데 현장실측 rebound량은 실내시험에서 구한 값과 비슷하거나 약간 적은 것으로 나타났다. 따라서 침하량 검토시 유효응력의 감소나 제하(unloading)로 인한 팽창을 감안하여 설계시 적용한 재압축지수(Cr)가 적정했음을 알 수 있었다.

4.5 지반개량 관련 현장조건에 대한 조치사례

4.5.1 프리로딩 중첩길이 산정

(1) 현장조건

4-2 및 5-1공구 연약지반 처리구간 내측의 시공연결 부위와 GSE 도로를 제외한 기타 무처리 구간과의 경계지역에 대한 프리로딩 중첩시공이 설계에 반영되어 있지 않아 지반개량 대상 연약층까지 충분한 하중전달이 어려워 공용하중 작용시 부등침하가 우려되었다.

(2) 조치사례

대상지반을 탄성적 단층지반으로 가정하고 재하하중과 설계하중에 의한 지반개량 대상심도별 하중조건을 비교함으로써 프리로딩 중첩폭을 산정한 결과 연약층 평균심도가 10m 일 때 프리로딩 중첩폭을 설계상 15m로 하는 것이 타당하나 이는 탄성론에 입각한 이론 해석결과이며 연약지반 상부의 강성이 큰 준설패립층 영향을 고려하지 않은 것이므로 실제 시공 시에는 경제성을 고려하여 중첩길이를 10m로 적용하고, 중첩부위의 대표지점에 침하판을 설치하여 하부지반의 안정여부를 확인한후 프리로딩을 제거하였다.

4.5.2 P/L하중 감소에 따른 대책

(1) 현장조건

부지조성공사 4, 5공구의 연약지반개량 공사중 프리로딩 재료인 준설패립토 단위중량이 당초 설계치인 1.8t/m³ 보다 작은 1.6t/m³으로 단위중량이 미

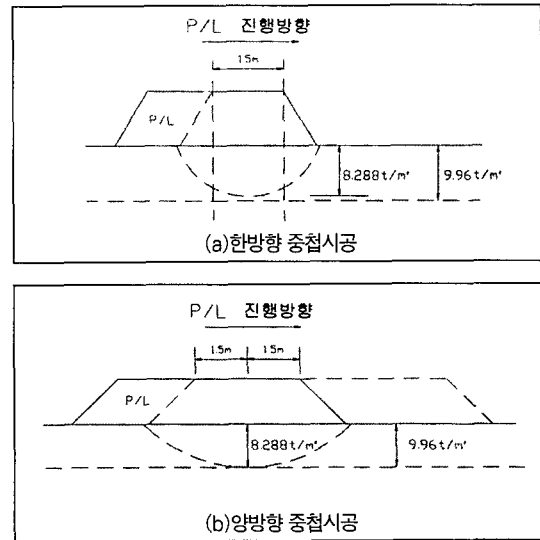


그림 14. 중첩시공 검토예

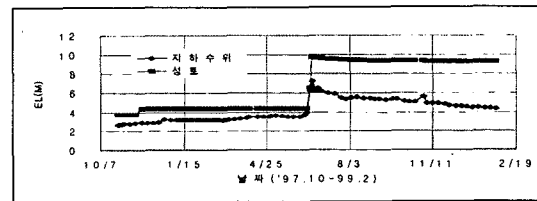


그림 15. 성토작업시 지하수위 변화

달되었고, 또한 지하수위는 그림 15와 같이 설계시보다 0.5~1.0m 상승되었다. 따라서 성토재의 유효응력 감소로 인한 압밀기간의 증가가 예상되는 실정이었다.

(2) 조치사례

프리로딩 하중 감소 대책방안으로 준설토 프리로딩 추가 재하방안과 지하수위 저하방안을 검토한 결과 시공성과 경제성 측면에서 유리한 추가하중 재하방안이 대책안으로 채택되었다.

검토방법 : 성토재의 단위중량 감소분으로 인한 부족하중을 계산하고 이에 따른 추가 성토고를 산정(추가성토고 = 부족하중 ÷ 프리로딩 단위중량)하여 프리로딩을 재하하였다.

5. 준설매립토에 대한 지반개량

5.1 개요

인천국제공항 부지조성공사시에는 영종도 지역의 준설매립토에 대한 효과적이고 경제적인 다짐공법을 선정하기 위해 다짐시험시공을 실시하였으며, 경제성 및 시공성 등을 감안한 최적공법은 유압식햄머 다짐공법으로 결정하였다.

5.2 시험시공

인천국제공항 부지의 준설매립토는 비교적 빈입도의 느슨한 조립토로 구성되어 있고, 층후는 원지반 고에 따라 2.0~6.1m 까지 다양하며 다짐시험시공 시 실시한 시료의 물리적 특성은 함수비 4.7~24.4%, 비중 2.65~2.66, #200번체 통과량 7.0~10.1%, 균등계수 1.5~3.0, γ_{dmax} 1.78~1.80kg/cm³, 최적 함수비 14.8~15.4%, 실내 CBR 19.1~22.5, 통일 분류는 SP-SM, Hilf(1991)로부터 추정된 다짐지수는 0.6~0.7 정도로 나타났다.

시험시공은 세립분 함유량이 비교적 적은 조립질 빈입도의 지반이 주요 대상이므로 지반의 특성, 국내 사례 및 간사이공항을 포함한 외국의 유사 사례를 조사한 후 적정 다짐공법으로 검토된 층다짐(roller compaction), 동다짐(dynamic compaction), 유압식 햄머다짐(hydraulic hammer compaction) 및 대형 진동햄머다짐(mammoth vibro tamping compaction)의 4 가지 방법을 시험시공에 적용하였다.

전체 규모 220m×100m에서 다짐공법간의 상호 간섭을 배제하기 위하여 다짐에너지가 가장 큰 동다짐공법의 영향범위를 기준으로 사례 조사한 결과 30m 이상에서는 다짐영향이 없는 것으로 보고된바 있으므로 공법간의 최소 이격거리를 30m로 하였다. 또한 준설매립층과 원지반의 정밀한 조사를 위해 현장 원위치시험 7중 1864회와 실내시험 7중 652회를

시행하였으며, 느슨한 준설매립층의 개량효과 파악을 위해 침하판, Screw식 침하봉, 공기식 간극수압계, 지하수위계 등 88개의 계측기를 설치하여 측정하였다.

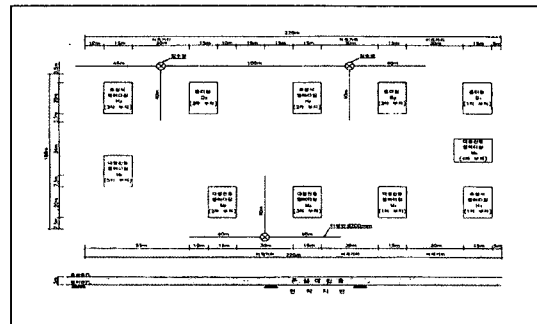


그림 16. 다짐시험시공 공법배치도

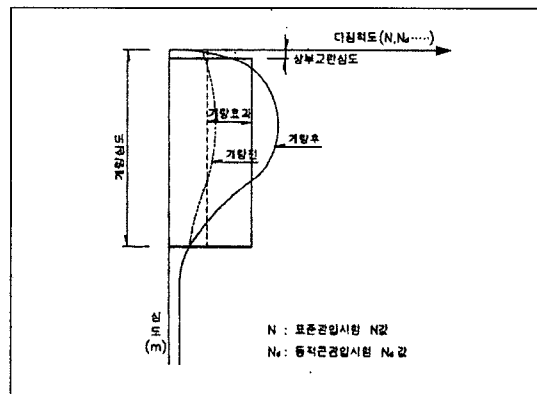


그림 17. 준설토 개량 및 교란심도 개념도

준설매립토에 대한 층다짐을 시행하였으나 세립분이 적고 빈입도인 본 준설토의 특성상 층다짐시 최대다짐도가 92~94% 범위로 나타나 노상의 다짐목표인 다짐도 95% 확보가 어려운 것으로 평가되었다.

시험시공에 적용된 다짐공법중 층다짐을 제외한 나머지 3개의 다짐시험시공 결과는 다음 그림 17, 표 9, 표 10과 같으며 공사의 특성과 현장여건, 경제성 등을 비교 검토하여 최적공법으로 유압식 햄머다짐공법을 선정하였다.

표 9. 공법별 준설토 두께 및 개량심도

공법	준설매립토 두께 (m)	개량심도 (m)	교란심도 (m)	비고
동다짐	5.2-5.5	4.8-5.4	1.3	
유압식 햄머다짐	5.2-5.6	4.2-5.4	1.0	
대형진동 햄머다짐	5.0-5.6	4.2-4.8	0.7	지하수위가 높을 경우 1.3m 까지 교란

표 10. 각 공법별 개량효과

공법	표준관입시험(N)		동적관입시험(Nd)		다짐도(%)		간극비	
	다짐전	다짐후	다짐전	다짐후	다짐전	다짐후	다짐전	다짐후
동다짐 공법	16~26	34~45	32~41	55~70	83.5~ 85.7	94.8~ 96.1	0.724~ 0.774	0.538~ 0.561
유압식 햄머다짐 공법	16~24	42~44	36~43	59~99	83.9~ 85.8	94.2~ 96.6	0.719~ 0.765	0.526~ 0.572
대형진동 햄머 다짐공법	20~25	39~45	33~49	87~103	84.9~ 85.6	94.0~ 96.9	0.727~ 0.747	0.530~ 0.583

1: GL.-3.0m까지 평균임.(상부 교란심도 제외)
지하수위가 낮고, 다짐에너지가 증가될수록 개량효과가 향상되었다.

그림 17 및 표 9에서 살펴본 바와 같이 준설매립토 상단에서 유압해머 다짐을 실시할 경우 다짐표면으로부터 약 1.0m가 교란되므로 본 공사에서는 준설매립토 상단에서 직접 다짐을 하지 않고 다짐효과를 높이기 위하여 준설매립토 상단에 추가로 #200체 통과량 25% 이하인 준설토로 1.0m 여성을 하고 다짐을 실시하였다. 또한 1.0m 여성을 하더라도 여성토 상단의 약 40cm는 다짐에 의한 체적감소가 발생하고 여성토의 나머지 60cm 및 노상(준설토) 상단의 약 30cm까지 교란되는 것으로 나타나 이에 대한 대책으로 여성토 60cm 및 노상의 교란부위 30cm를 제거하고 준설매립토 노상 상단으로부터 30cm 위치에 PP매트 포설후 산토 15cm 두께를 2층으로 층다짐하여 100% 다짐으로 관리하는 것이 적절한 것으로 평가되어 본 공사시 이를 적용하였다.

5.3 시공 및 품질관리

(1) 유압식 햄머다짐 시공과 품질관리

유압식 햄머다짐공법은 동다짐과는 달리 고공에서 다짐추를 낙하시키지 않고 비교적 짧은 거리에서 중량의 햄머(7ton, 10ton)를 낙하시켜 햄머 하단의 foot를 지표면에 타격하여 그 충격력으로 지반을 개량한다. 따라서 신속하고 정확한 반복타격이 가능하다. 인천국제공항 부지에 적용한 유압식 햄머다짐 장비 구성은 크레인의 크기는 80, 100ton, hydraulic hammer는 7, 10ton, bull dozer규격은 19ton이며 햄머다짐광경과 타격시리즈는 다음 그림 18, 그림 19와 같다.

공중별 준설매립토 다짐관리기준은 다음 표 11과 같이 적용하였다.



그림 18. 유압식 햄머다짐 전경사진

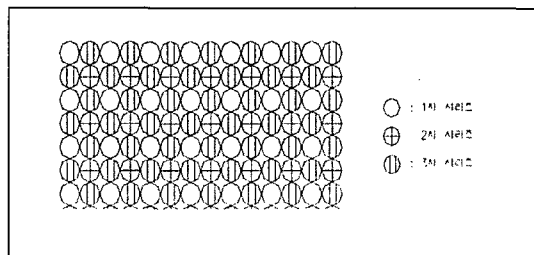


그림 19. 유압식 햄머다짐 타격시리즈

표 11. 준설매립토 다짐관리기준

구 분	활주로, 유도로	활주로, 유도로 노건부	착륙대 (활주로 중심선에서)		도로포장	비고
			75m구간	기타 구간		
다짐 방법	Ram무게 낙하고	10t 1.2m	10t 1.2m	7t 1.2m	7t 1.2m	타격 간격 3.0× 3.0m
다짐관리기준 (CPT시험)	상부 0.3m: 100% 하부 1.7m: 95%	95%	95%	90%	95%	
	노상 : 20Mpa, 노체 : 15Mpa					

(2) 구조물 주변 다짐시험시공

인천국제공항 지하차도와 같은 지하구조물의 경우 유압식 햄머다짐 작업전 가시설을 시공하고 구조물을 축조한 뒤 다짐작업시 구조물에 손상이 미치지 않는 진동영향거리를 측정하기 위하여 진동계측기를 구조물 상부 slab에 1개소, 측벽에 2개소, sheet pile에 1개소를 설치하고 그림 20과 같이 구조물 외벽에서 24m 떨어진 지점부터 1.5m 간격으로 구조물 box에 접근하면서 시험시공을 실시하고 다짐위치별로 구조물에 미치는 진동영향을 분석하였다.

표 12. 유압식 햄머다짐 제한

유압식 햄머 중량	타격 횟수	낙하고(타격높이)	비고
10ton	20회	1.2m	
7ton	20회	1.2m	구조물에 최대한 가까이 햄머다짐
	20회	0.8m	시공을 위해 낙하고를 줄여 시행

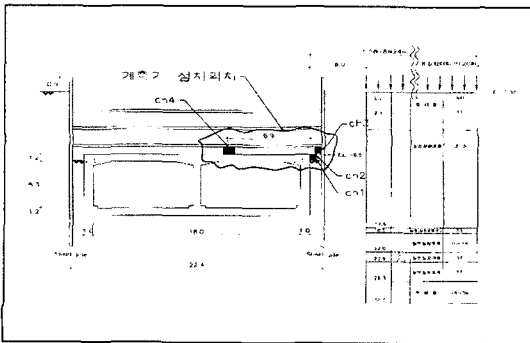
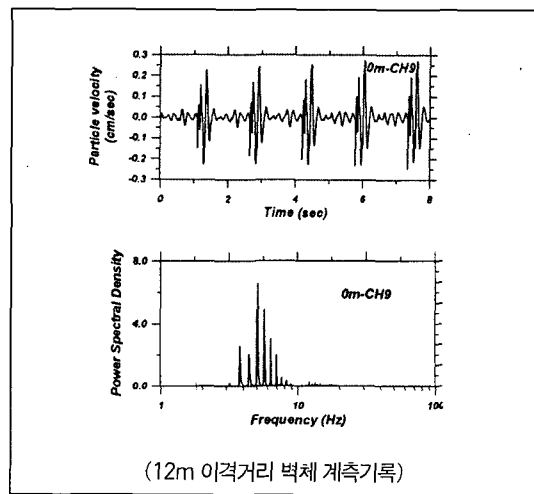


그림 20. 유압식 햄머다짐 시험시공 단면

지하차도에서 계측된 진동계측 결과는 벽체 상단 부에서 PV(Zero to Peak Particle Velocity) 값의 크기는 0.07~0.4cm/sec로 계측되었으며 sheet pile에서의 크기는 약 10배 정도인 0.25~4.0cm/sec로 계측되었다. 계측된 진동의 주파수 대역은 3~8 Hz의 저주파 대역에 분포함을 알 수 있으며 대표적인 시간이력과 주파수 영역 계측곡선은 그림 21과 같다.



(12m 이격거리 벽체 계측기록)

그림 21. 시간영역 진동이력곡선 및 주파수영역 진동이력곡선

또한 유압식 햄머다짐으로 인하여 발생한 지하차도 구조물 벽체 및 가시설 sheet pile 벽면에서의 진동 최대입자속도 PV(Zero to Peak Particle Velocity)를 거리에 따라 그림 22과 같이 도시하였다.

주파수 대역에 따른 허용진동기준은 국내에 정립되어 있지 않으므로 미국 또는 독일의 주파수 대역 기준을 비교 검토한 결과 인천국제공항의 주파수 대역이 독일의 경우와 유사하고 또한 구조물의 다짐손상을 최소화하기 위하여 유압식 햄머다짐시 허용진동기준을 표 13와 같이 설정하였다. 이와 같은 기준에 따라 인접 구조물의 안전성이 확보될 수 있는 유압햄머다짐 적정 이격거리를 포장, 비포장지역 구분 없이 20m로 결정하였다.

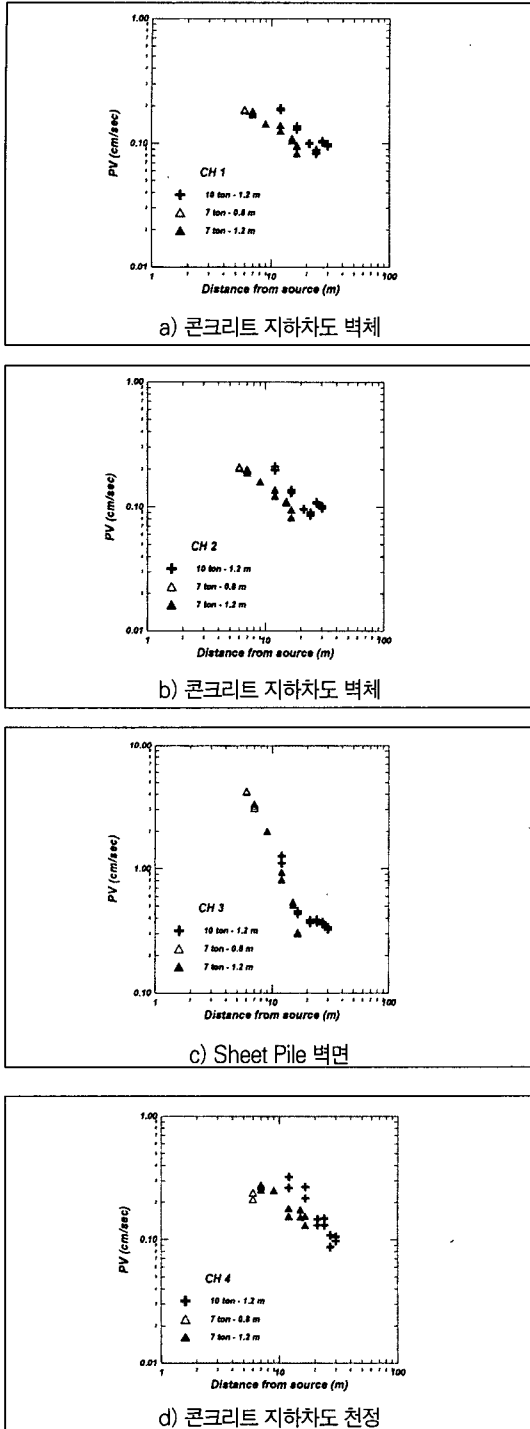


그림 22. 타격 거리별 지하차도 Con's벽체의 진동감쇠곡선

표 13. 구조물 유압식 햄머다짐시 허용진동기준

	검토안			적용	비고
	미국	독일	국내	인천국제공항	
허용진동속도 (cm/sec)	1.27	0.3	0.5	0.3	미국의 경우 구조물의 형태나 중요도가 고려되어 있지 않다.
주파수	3~10Hz	10Hz	구분없음	3~8Hz	

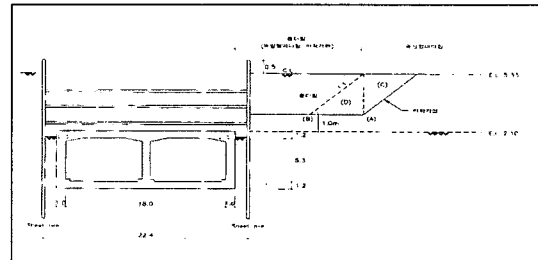


그림 23. 유압식 햄머다짐에 의한 유효다짐구간의 확인시험 단면도

한편 유압식 햄머다짐의 주개량 심도(GL-1.1m~ 원지반 상단 0.5m)를 감안할 때 유압식 햄머다짐과 층다짐 경계지점의 층다짐을 위한 터파기 사면 당초 계획은 그림 23의 (B)지점을 기준으로 터파기를 하려 하였으나 시험시공 결과 (D)부분에 대한 유압식 햄머 다짐 중복효과가 부족하여 (A)지점을 기준으로 터파기를 실시하였으며 준설매립토(SP-SM)의 경우에도 다짐을 잘하면 터파기 사면을 1:1로 하여도 사면붕괴가 없음을 알 수 있었다.

6. 지반개량의 기타 공중 시공사례

6.1 가시설공사

인천국제공항에서는 지하차도, 공동구, 여객터미널, 교통센터 등 주요 구조물공사를 위한 가시설공사를 수행하였으며 적용공법은 먼저 sheet pile을 타입하여 벽체를 조성하고 Ground anchor(이하 "앵커" 또는 "G/A"라 칭함) 또는 버팀보(strut)로 이를 지지하면서 굴착해 나가는 개착식 흙막이공법을 전 구간에서 적용하였다. 가시설공사와 관련된 여러 가지 시공사례들이 있으나 이를 모두 다루기에는 지면

관계상 부족하여 본고에서는 가시설공사중 점성토 지반에서의 앵커설계와 시공사례, 압축형 앵커의 적용성 및 가시설 계층공사비에 대한 사항만을 기술하고자 한다.

(1) 점성토 지반에서의 앵커설계 및 시공사례

앵커설계에 있어서는 지반조건에 대한 설계자의 견해 차이에 따라 설계패턴이 다소 상이할 수 있다. 인천국제공항의 주요 구간별 앵커 설계내용을 보면 앵커 정착부를 N치 9~25의 점성토층에 형성시킨 경우, N치 35~50의 조밀한 사질층에 형성시킨 경우, N치 50 이상의 풍화대에 설치한 경우 등으로 다양한 편이다(표14 참조).

일반적으로 가설앵커라 함은 내구연한이 2년 이하인 앵커로 볼 수 있는데 인천국제공항의 여객터미널에 시공된 앵커는 그림 24와 같이 평균 N치 15정도의 견고한 점성토층에 정착부를 형성하였으나 앵커 시공후 해체시까지 그림 25와 같이 약 2년간 소정의 축력을 지속적으로 유지한 것으로 나타났다. 한편 앵커축력은 시간경과에 따라 서서히 감소하는 것이 일반적이나 그림 25에서와 같이 공사 후반부에서 축력

이 증가한 이유는 sheet pile 배면부가 공사용 도로로 활용되었고, 구조물공사를 위한 각종 자재적치로 인해 상재하중이 증가된 영향으로 분석된다.

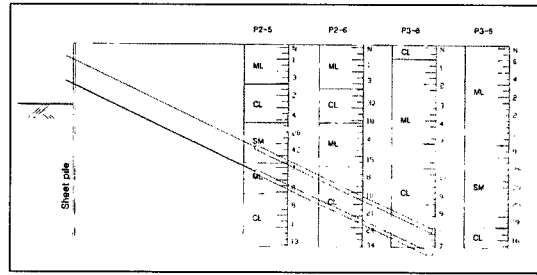


그림 24. 여객터미널 앵커 정착장 위치의 지질주상도

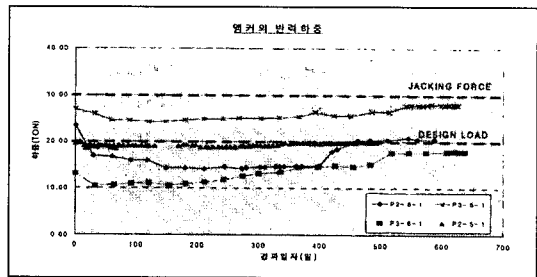


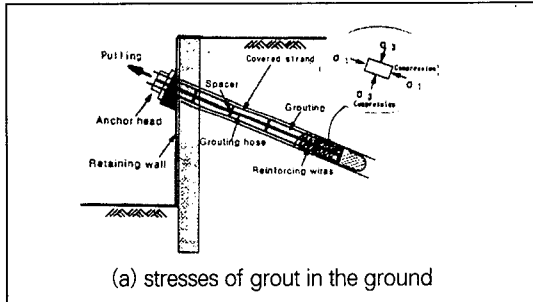
그림 25. 여객터미널에 시공된 앵커축력 경시변화도

표 14. 인천국제공항 주요 구간별 가시설 앵커 설계현황

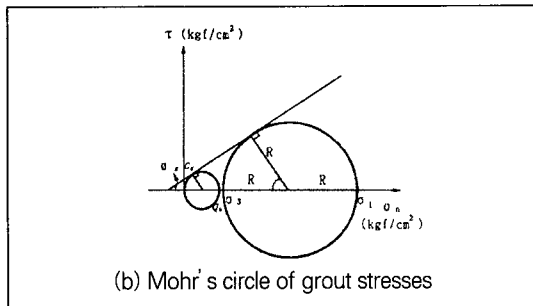
항목	구간	여객터미널	IAT/BHS	고가교량	교통센터	철도노반	Airside	
							공동구(남측)	공동(북측)
굴착심도(m)		3.6~10.0	9~14	9~15	5~9	15~25	11~14	10~14
지지방식		sheet pile+G/A	sheet pile+G/A	sheet pile+G/A	sheet pile+G/A	sheet pile+strut+G/A	sheet pile+strut+G/A	sheet pile+strut+G/A
앵커 시공장 (m)	자유장 ^①	12~15	6~25	17~26	16~18	5~40	11~36	19~27
	정착장 ^②	14~17	7~13	15	14	6~20	10~19	9~12
	총길이 ^{①+②}	29	19~33	31~41	30~32	12~50	25~46	31~36
천공각(°)		30	35	40	30	40	40	35
강선수(본)		4	4~7	4	4	4~8	7~9	5~6
긴장력(ton)		30~40	40~89	34~36	25~3	33~81	67~103	49~63
정착부 지층조건		CL, ML, SM (N=9~25)	SM (N=35~50)	CL, ML (N=11~38)	CL (N=8~38)	CL, SM (N=12~45) 풍화토 이상(N)50	풍화토 이상(N)50	풍화토(N=32~50)
정착부주면 마찰력(kg/cm ²)		1.0~1.2	2.3~2.9	1.0	0.8~1.0	0.25~7.0	2.5~3.5	2.7
앵커간 수평간격(m)		1.6	2.0~2.4	1.6	1.2~2.0	1.6	1.6~2.4	2.4
앵커간 수직간격(m)		2.3~2.4	1.8~3.0	1.8~1.9	2.0	1.7~2.2	2.0~2.7	1.6~2.3

(2) 압축형 앵커의 적용성

인천국제공항 일부 현장의 앵커설계시 압축형 앵커(일명 "U-turn 앵커")가 도입된 바 있었으나 현장 인발시험시 인발력이 확보되지 않아 일반 인장형 앵커로 설계변경한 사례가 있었다. 설계도서와 인발시험자료를 검토해본 결과 점성토 지반에서 압축형 앵커를 시공할 경우 주입재 그라우트의 지압강도가 발휘되지 않아 앵커체가 파괴되는 것으로 나타났으며, 이는 최근 임종철(2000) 등의 연구결과와도 일치되는 현상이다. 따라서 점성토 지반에 압축형 앵커를 시공할 경우에는 그라우트체 주변에 구속압(confining pressure)이 확보될 수 있도록 그라우트 부위에 강선이나 casing 등의 보강을 통해 소정의 지압강도가 발휘될 수 있도록 조치해야 할 것으로 판단된다.



(a) stresses of grout in the ground



(b) Mohr's circle of grout stresses

그림 26. 지반의 구속압 효과 (임종철 등, 2000)

(3) 가시설 계측공사비

인천국제공항의 주요 구간별 가시설 계측공사비는 한국엔지니어링 진흥협회에서 발간한 토질 및 기초조사 표준품셈에 준하여 계상되었으며 토목공사비

(굴토 및 가시설)와 비교하면 2.7~3.7%정도이다. 이는 일본의 경우인 1~3%(평균 2%)와 비슷한 수준으로 공종별 공사비와 계측비의 비율은 대체로 적정 수준인 것으로 사료된다(그림 27 참조).

다만 기존의 품셈은 주로 일반화된 수동계측기를 대상으로 제정되어 있으므로 새로운 계측기나 최근 사용이 급증하고 있는 자동화 계측기에 대해서는 적용이 불가능한 상태이므로 계측품셈의 개정이 시급한 실정이다.

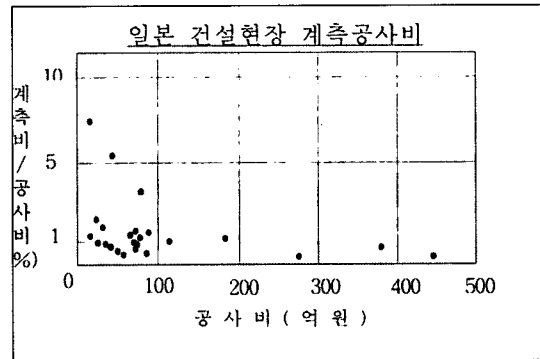
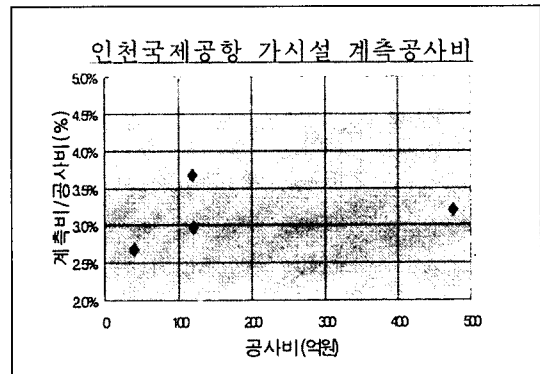


그림 27. 토목공사비와 계측공사비 비교자료

6.2 공항포장 시험시공

본 공항의 경우는 포장의 강도와 소성변형, 해안 매립 지반의 침하, 항공기의 대형화 등 여러 요건을 고려하여 설계되었다. 이와 같은 기준에서 활주로 등 항공기 이용지역에 대한 최적 포장공법과 포장단면,

포장재료를 선정하기 위해 국내학계와 미국 MIT대학 및 노스캐롤라이나 주립대학의 전문 기술진이 참여한 가운데 포장시험시공 계획을 수립, 시행하였다. 이에 따라 연약지반이 완료된 지역내 강성(콘크리트) 포장, 연성(아스콘)포장 구간으로 구분하여 타원형 트랙을 만들고 공항의 활주로 및 유도로, 계류장은 일반도로 포장보다 10배 이상의 하중에도 견딜 수 있고 또한 교통의 반복횟수, 주행하중, 타이어 압력 등을 고려하여야 하므로 포장두께와 기하구조를 달리 하였다.

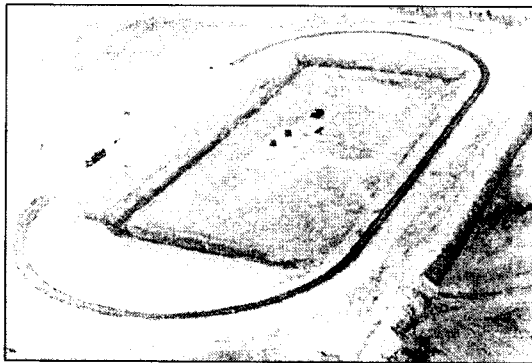


그림 28. 포장시험시공 전경

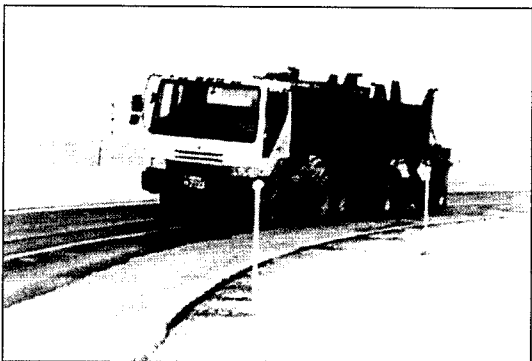


그림 29. 시험주행차량 전경

그림 28, 29와 같은 타원형의 주행트랙 총 연장 842m구간에 양쪽 직선구간에 강성(콘크리트) 시험 포장(190m×9m) 7개 단면과 연성(아스콘) 시험포장(190m×6m) 6개 단면을 제외한 곡선부에 연성포장(652m×6m)구간을 시공하여 주행횟수 증진에

유리하도록 구성하였다.

1) 시험시공 세부 내용

지반과 포장체의 물성 및 역학적 특성을 파악하기 위해 현장조사 및 시험(19종 769회)과 실내시험(18종 274회)을 실시하였으며, 강·연성 포장체를 위한 시방배합설계(13종 62회)를 시행하였다. 또한, 포장 공법 및 포장단면을 분석함에 있어 실제 포장의 응력과 변형관계, 포장의 균열거동 및 포장수명을 예측하기 위해 설치된 계측기 9종 515개를 설치하여 계측 및 구조해석에 따른 공용성 평가를 수행하였다. 747-400항공기의 바퀴를 장착한 94톤 중량의 트레일러가 매일 24시간동안 450회씩, 4개월의 시험기간 동안 45,000회를 주행시키면서 최적 포장상태를 평가하는 방법을 사용하였다. 트랙 곳곳에 설치된 9종 515개의 계측기를 통해서 포장체 수명·내구성·지반거동분석 등 포장단면의 안전성을 검증하였다.

2) 결과분석 및 적용

포장시험시공 결과에 따라, 연성포장 표층부의 과도한 소성변형으로 인하여 시험시공전에 예상했던 결과를 도출할 수 없었기 때문에 추가적으로 과업기간을 연장하여 기존 표층부(15cm)를 Milling machine으로 절삭한 후, 재래식의 일반 마살배합(FAA입도)과는 다른 공용성 개념의 미국 AI (MS-2)식 마살배합(FAA & Superpave입도) 설계에 따라 추가시험시공을 실시하게 되었다. 시험주행차량을 5,000회(약 1개월) 운행하여 연성포장 표층부의 소성변형을 측정하였으며 그 결과, Superpave입도로 배합설계된 단면이 기존의 FAA입도로 시공된 설계단면보다 포장 공용성이 우수하였고, 실내모형실험인 휠 트랙킹 시험에서도 동일한 결과를 얻었다.

6.3 공용이후 장기 침하계측관리

연약한 점토지반의 개량공사, 준설매립도 다짐공사, 포장공사가 완료됨에 따라 프리로딩 제거시 잔류압밀침하와 2차 압밀침하 거동을 파악하고 지반침

하로 인한 영향이 포장에 어느 정도의 영향을 미치는지를 파악하기 위해서는 공항의 주요시설인 활주로, 유도로, 계류장 등 포장지역에 최소한의 영구 계측 항목이 필요한 것으로 판단되어 계측기 위치선정은 항공기 운항이 많은 활주로, 유도로, 계류장 지역, 연약층 심도가 깊어 침하의 우려가 있는 지역, 지반 개량후 잔류침하량이 상대적으로 많아 2차 침하가 우려되는 지역에 표 15 및 그림 30과 같이 장기계측기를 설치하였다.

표15. 계측항목 및 계측기기 선정

계측항목	선정 계기	설치개소
층별침하 측정	Rod Extensometer (hydraulic anchor type)	활주로, 계류장 등 9개소
지표침하 측정	Rod Extensometer (hydraulic anchor type)	활주로, 계류장 등 15개소
	EL. Beam (electrolytic type)	활주로 2개소
수위관측점	Observation well	녹지 7개소
Data Logger	CR 10X	녹지 9개소

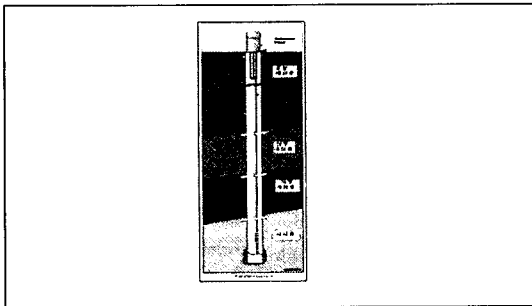


그림 30. Rod Extensometer

포장공사 완료이후 약 6개월의 계측결과 활주로 1mm, 유도로 3.4mm, 계류장 4.9mm의 침하량을 나타냈으며, 이는 연약지반 개량이후 AIRFIELD지역 활주로 잔류침하량(현장관리: 2.5cm, 설계허용잔류침하량 7.5cm), 유도로 및 계류장 잔류침하량(현장관리: 5.0cm, 설계허용잔류침하량 10.0cm)보다 아주 적은 침하(변위)량이며, 현 시점에서 실측된 계측값을 가지고 회귀분석을 시행한 결과 20년후의 예측 침하량 또한 허용침하량 이내로 분석되어 향후 침하로 인해 포장체에 미치는 영향은 극히 미미할 것으로

분석되고 있다.

다만, 현재까지의 계측결과에 의하면 포장체 하부 지반의 침하는 직선형이 아닌 2차 또는 3차 곡선 이상의 비선형 거동 특성을 보이고 있는 바 장래 침하량의 예측정도(accuracy)를 보다 높이기 위해서는 적어도 2년 이상 계측자료를 수집한 후 분석을 시행하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

7. 결론

인천국제공항 공항토목시설공사를 위한 연약지반개량 시공사례와 기타 공종으로서 가시설, 공항포장, 장기 침하계측관리 등에 대한 연구 결론은 다음과 같다.

1) 시험시공에 의해 인천국제공항 지역의 연약지반개량공법으로 선정된 Sand Drain과 Plastic Board Drain 공법 적용결과 지반개량 전·후의 물리, 역학적 특성치가 뚜렷이 변화하였으며, 계측에 의한 지반개량 관리시 모든 구간의 잔류침하량이 설계 허용잔류 침하량 보다 적은 값으로 되도록 엄격히 관리하였으므로 장래 항공기 하중이 작용하여도 포장체 하부지반의 안정에는 이상이 없을 것으로 판단된다.

2) 연약지반 개량도 평가는 사전·사후 확인조사와 계측기(지표면침하관, 간극수압계 등) 분석결과에 의한 압밀도 및 허용잔류침하량의 적정 판정기준에 따라 프리로딩제거시기를 결정하였고, 사후확인 조사는 실내시험결과, 자연함수비, 간극비 등의 감소와 더불어 비배수 전단강도의 증가를 확인하였으며 또한 현장배인시험과 피에조콘시험결과로 산정한 비배수 전단강도 증가율은 0.38로써 서로 비슷한 양상을 보이고 있다.

3) 설계시 적용한 압밀계수와 실측 압밀계수 비교 결과 대체로 유사한 경향을 보이나, 일부원지반 압

밀계수는 교란정도와 배수재의 설치간격에 따라 설계에 적용된 실내압밀계수가 과소 평가되는 것을 알 수 있었으므로 정확한 지반개량효과를 얻기 위해서는 C_h 와 C_v 의 상호관계를 현장시험시공 등을 통하여 충분히 규명하고 그 결과를 설계에 적용하는 방법이 타당할 것으로 판단된다.

4) 준설매립토에 대한 다짐시험시공결과 최적공법으로 유압식 햄머 다짐공법이 선정되었으며, 항공기 하중을 충분히 지지할수 있도록 준설토 다짐작업시 CPT 시험결과에 따라 노상 20Mpa, 노체 15Mpa 이상의 관리기준을 적용하였다.

5) 점성토 지반에서의 가설앵커 시공시 정착부가 견고한 사질층이 아닌 N치 15정도의 점성토층에 형성되어도 앵커의 구조적 성능이 양호하게 발휘되는 것을 알 수 있었으며, 압축형 앵커는 점성토지반에 시공시 그라우트 주변의 구속압이 확보될 수 있도록 그라우트 부위에 강선 이나 casing 등의 보강조치가 필요한 것으로 판단된다.

6) 활주로, 유도로, 계류장 등 공항주요시설에 대한 장기침하 계측결과 포장공사 완료후 약 6개월간 1~5mm 정도의 미소한 침하가 발생된 것으로 나타났다. 실측된 계측값으로 회귀분석을 실시한 결과 20년후의 예측침하량 또한 허용침하량 이내로 분석되므로 향후 포장체 하부지반의 안정성에는 전혀 문제가 없을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 신공항건설공단(1995. 12), "수도권신국제공항 부지조성공사 시험시공용역 종합보고서"
2. 신공항건설공단(1995. 12), "수도권신국제공항 부지조성공사 실시설계보고서"

3. 신공항건설공단(1996. 3), "수도권신공항 다짐시험시공용역 종합보고서"
4. 신공항건설공단(1998. 5), "인천국제공항 포장시험시공용역 종합보고서"
5. 인천국제공항공사(2000), "인천국제공항 연약지반 개량백서"
6. 최인걸(1998), "인천국제공항 준설매립 시공사례", 한국지반공학회 학술발표회 논문집, pp. 88~92.
7. 최인걸 외(1999. 3), "인천국제공항 공항토목시설공사구조물 주변 다짐시공 사례연구", 한국지반공학회 학술발표회 논문집, pp. 455~462.
8. 최인걸 외(2000. 6), "인천국제공항의 연약지반개량에 관한 연구", 한국농공학회 학술발표회 논문집, pp. 105~118.
9. Choi, I. G., Kim, J. K., Park, Y. M. and Chung, Y. I.(2000. 10), "A Case Study of the Soft Ground Improvement for Incheon International Airport", pp. 237~244.
10. 최인걸 외(2000. 11), "인천국제공항 연약지반의 활주로 포장시공 사례연구", 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집, pp. 109~115.
11. 한석희,한경제,고문수(1998), "굳은 점토에 정착된 앵커의 거동특성고찰", 한국지반공학회 정보화시공 기술위원회 · 터널기술위원회 공동발표회 논문집, pp. 3~15.
12. 임종철,이태형,홍석우(2000), "압축형 앵커의 선단정착부 그라우트 보강에 따른 압축저항력 산정에 대한 연구", 한국지반공학회 논문집, Vol.16 No.5 pp. 213~226.
13. 日本土質工學會(1990), "現場計測計劃の立て方", pp. 9~11.
14. Kang, B. H.(1999), "Geotechnical Aspects of the New Incheon International Airport Project", Proc. of 11th ARC SMGE. Seoul Korea, pp. 73~74.