

인천국제공항 연약지반처리 사례연구 인천국제공항 준설 매립토의 노반재 활용 사례연구(I)

김종국*, 최인걸*, 김용철*, 이강운*, 채영수*

인천 국제공항에서 수행한 지반처리 관련 연구사례를 4회에 걸쳐 단계별로 소개하고자 한다. 1,2단계는 준설매립 관련이고, 3,4단계는 연약지반 관련 사례이다.

1. 서 론

국토면적이 협소한 우리나라는 공간건설용 부지 확보와 사회 기반시설 축조용 임해단지 개발을 위해 매립공사가 널리 수행되어 왔으며, 조성된 공간부지는 국가 경제 발전에 기여하는 바가 컸다. 그러나 최근 도취장에서 생산되는 매립용 토사는 환경문제와 운반비에 따른 경제성면에서 불리하므로 인근해안 해저지반에 매장되어 있는 토사를 준설하여 사용하는 방법이 적극 추진되고 있다. 특히 해안 주변에 건설되는 대규모 공항이나 도로 등은 이같은 면을 고려할 때 준설토 활용방안이 적극 모색되어야 한다. 준설매립은 수면하부의 토사를 불과 함께 준설 압송하여 퇴적시켜 부지를 조성하는 방법으로서 초기상태는 물과 흙입자가 혼합되어 Gel 상태의 액성상태로 존재하나 시간이 흐르면서 흙입자는 수중에서 침강하여 새로운 지반을 형성한다. 이때 침강되어 형성된 지반

은 토립자의 크기, 준설시 물의 유동속도, 소금물의 농도, 토출구의 간격 등 준설조건에 따라 다른 특성을 보인다.

인천 국제공항 지역에 매립된 부지는 이같은 영향 등을 고려하여 준설토취장을 선별하였으나, 노반재로서 퇴적 매립된 준설토의 두께가 평균 3m~5m 내외인 상태에서 #200체 통과율이 6.0 - 18.0 %이며, 입도가 불량(Cu(3)하여 다짐이 용이하지 않을 뿐만 아니라 자중압밀된 준설토는 고풍수비로서 입자의 Interlocking 현상을 발휘할 수 있는 다짐도가 약해 노반재로서 직접 사용하기에는 무리가 있었다. 특히 대상지역이 공항인 점을 감안할 때 항공기 이·착륙시 발생하는 하중조건을 만족하기에는 한계가 있다.

이같은 조건을 만족하기 위해 지반개량을 실시하였으며, 개량공법은 시험시공결과에 의거 유압식 햄머다짐공법을 최적공법으로 선정하였다. 본 공법이 적용된 지역은 활주로, 유도로 및 계류장으로서 포장시 소요 다짐 관리기준을 만족하는 판입시험 판리기 준을 설정하였다.

2. 공사개요

인천 국제공항이 건설된 영종도 및 용유도 지역은 국제 항공수요의 90%를 차지하는 인구 2,000만의 수도권 배후지역으로 조수간만의 차가 8m에 이르는 섬사이의 간석지를 성토하여 개발되는 지역이며, 연약지반 두께가 평균 5m에 불과하여 부지조성이 용

*정회원, 한국건설품질시험원 지반지출현 과정
*정회원, (주)유신코퍼레이션 일산-퇴계원고속도로감리단 도질 및 기초 책임 감리원
*정회원, 인천국제공항공사 기술개발팀 대리
*정회원, (주)동성엔지니어링 상무이사
*정회원, 수원대학교 토목공학과 교수

표 1. 인천 국제공항 사업 규모

구 분		인천 국제공항		김포공항
		1 단계	최종 단계	
단지 조성	부지 면적 (배후지원단지)	355만평 (86만평)	1,435만평 (264만평)	214만평 -
항공 시설	활주로(m) (연간처리능력)	2개(3,750x60) 17만회/1개	4개(3,750~4,200x60) 53만회	2개(3,600x45, 3,200x60) 19.5만회
	여객터미널(만평) (연간처리능력)	10.8 (2,700만명)	33.9 (1억명)	-
	화물터미널(만평) (연간처리능력)	4.5 (171만톤)	16.9 (700만톤)	79,000㎡ (170만톤)
	항공보안시설	CAT-IIa	CAT-IIb	CAT-II
	교통 시설	전용도로 전용철도	6~8차선, 54.5km 용지매입	8차선, 54.5km 복선, 57.3km
사업기간		1992~2000	2020년까지	-

이라고 지역경제 발전에 기여할 것이 클 것으로 예상되는 지역이다. 지경학적 면에서도 서울을 중심으로 100km 이내이며, 수도권 이용객이 사용하는 데도 무리가 없을 것으로 예상되는 지역으로서 본 공사는 1982년에 착수하여 2001년 3월, 1단계 개항을 목표로 진행된 사업이다. 공항부지 조성계획은 항공수요 및 공항시설 배치계획에 따라 단계적으로 부지를 조성하였으며, 먼저 1단계 계획은 2001년초 개항을 목표로 활주로 2개소를 비롯하여 유도로와 계류장, 그리고 여객터미널을 비롯해 각종 부대시설, 국제업무 지역등의 시설을 수용할 수 있는 부지 355만평을 조성하는 사업이며, 최종단계는 1,435만평을 조성하는 공사이다. 본 부지조성 계획 사업규모를 보면 다음 표 1과 같다.

이중 1단계 부지조성공사는 남·북 방조제사이인 매립하는 공사로서 이는 Airside 지역, 여객 계류장 지역, 화물 및 정비 계류장, 급유시설 및 국제업무, 기타지역으로 구분하여 조성되었다.

3. 지형 및 지층현황

인천 국제공항은 서울도심에서 100km떨어진 영종도와 용유도 사이의 간사지에 위치하는 해상에 축조되는 공사로서 행정구역상으로는 인천광역시 중구 운서동, 운북동, 덕교동사이에 위치하는 지역이다.

본 현장의 지형적 특성은 그림 1과 같이 동서방향으로 6km, 남북방향으로 4km를 연결하여 남북 방조제내의 간사지 위에 축조되는 공사이다. 북측방조제 및 남측방조제의 원지반고는 각각 EL.(-)0.5~(-)3.2m와 EL.(+)1.6~(-)7.1m로서 계획고 대비 3.6m~12.3m의 표고차가 발생한다. 본지역의 해안선은 한반도 서해안의 특징인 리아스식 해안으로 굴

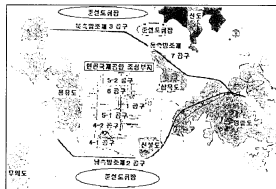


그림 1. 인천 국제공항 부지조성 지형현황

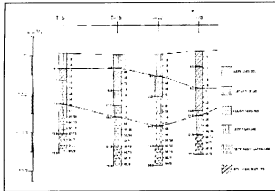


그림 2. 황주지역의 대표 지질주상도

곡이 심하고 크고 작은 섬들이 산재해 있으며 해상지역의 대부분은 간조시 육상으로 노출되는 간석지로서 대체로 평평한 지형을 보이고 있다.

그리고 신공항지역 일대의 지질은 선크브리아기의 편마암류가 넓게 분포하고 있으며 신불도와 삼목도는 중생대의 대보화강암이 부분적으로 분포하고 있다. 주 구성광물은 석영, 장석, 흑운모 등으로 중립 내지 조립질을 나타내고 해상지역은 대부분 제4기 층적층 화강암류들이 두껍게 피복하고 있으며 전형적인 지층분포 및 지질주상도는 각각 그림 2와 같다.

지층 구분은 크게 해성퇴적층과 풍화 잔류토 및 암반층으로 나뉘며, 해성퇴적층의 경우 지역에 따라 차이는 있으나, 최대 37.5m 깊이까지 분포하고 대부분

20.0~25.0m정도로 퇴적되어 있으며, 심도에 따라 지층은 상부에 비하여 하부는 매우 Stiff한 상태이다. 또한, 기반암인 연암은 화강암과 편마암이 풍화되어 균열이 있는 것으로 나타났으며, 시추시 채취된 코어 회수율은 5~15%정도로 전반적으로 저조한 편이다.

그리고 본 지역의 퇴적층은 전형적인 해성 퇴적토로서 조수간만의 차에 따른 해저 유동작용으로 인해 사질토와 점토층이 반복하여 퇴적되어 있으며 함유비가 25.4%~38.5%, 액성한계 29.9%~49.4%, 소성한계 14.0%~23.4%, 압축압축강도 0.232kg/cm²~1.110kg/cm², 압축지수는 0.12~0.75의 분포를 보이는 지반이다.

4. 준설매립

4.1 준설토 현황

본 공항이 건설될 부지규모는 약 1700만평이며, 이중 해수부 부지는 약1400만평으로 평균두께가 5m(최대 11.5m)내외인 해성점토층으로 구성되어 있어 지반개량이 필요한 지역이다. 부지 계획고에 의거 소요 성토고는 평균 5m 내외이고, 공항부지조성에 필요한 전체토량은 1억 7900만m³이며, 이중 준설

표 2. 준설토취량의 토질 분포

도취장 (ZONE)	위치	지형 및 수심	토질 분포
I	· 남측방조제 · 남측 간석지 구역	· 수심 :EL(-)5m~EL(±)0m · 완만한 경사로 남측에 수로	· 방조제 인근간석지의 토질로 대체로 불량 (#200체 통과량) 80~90%) · 방조제 1.5km지점 #200체통과량) :36%
II	· 북측방조제 · 북측 간석지 및 수로구역	· 수심 :EL(-)20m~EL(-)1.0m · 방조제, 심도주변의 간석지,중앙수로	· 방조제 중앙부의 전연간석지 양질의 사질토 부분적으로 분포(#200체 통과량 (15%) · 중앙 수로부 : 대체로 실트함유량 40~50%
III	· 동측방조제 · 북측 간석지 및 수로구역	· 수심 :EL(-)5m~EL(±)0m · 심도-영종도사이 중앙부 간석지	· #200체통과량이 70%이상, · 부분적으로 양질 토사층제(조사자료 미흡)
IV	· 밀이도 북측 인접 · 간석지 구역	· 수심 :EL(-)5m~EL(±)0m · 깊게 발달된 사주형태	· #200체통과량이 6%미만으로 다소 양호



그림 3. 준설토의 배사관 전송 후 매립과정

토량은 1억 1600만 m^3 로써, 1단계 건설공사 면적 355만평을 매립하는데 소요되는 준설토량은 5200만 m^3 이다. 준설은 남 북측 방조제 외측 해역에서 채취 가능량을 근거리에서 확보 가능하도록 지형측량과 토질조사를 실시하여 매장량을 산정하였으며, 4개 지역으로 구분하여 시공성 및 경채성 그리고 준설능력을 고려하여 준설토량을 산정하였다. 1차적으로 원지반 준설토의 사용가능성등을 판단하기 위해 개략적으로 지역별 입도시험을 실시한 결과를 보면 다음 표 2와 같다.

표 2와 같이 본 준설토는 지역에 따라 입도분포차가 커서 매립제로 직접 사용하기에는 한계가 있는 것으로 나타나 운반방법상 사용토량을 조절하여 유하 거리에 따른 퇴적토의 입도관리기준을 설정하였다.

4.2 준설방법

준설매립공사는 특수한 경우를 제외하고는 해체에 퇴적된 토사를 준설선을 이용하여 배사관을 통해 목적지까지 전송하는 공사로서 사용되는 준설선의 형식 및 준설토사의 운반처리 방식에 따라 시공방법이

구분된다. 이에 따른 매립방법은 펌프준설선 방식과 준설선과 흙 운반선을 병행하여 적용하는 방식으로 구분되는데 두 경우 모두 준설선이 이용되며 준설선의 종류는 크게 펌프계와 버켓계로 나뉜다. 시공순서는 매립계획 수립후 매립지의 해양기상조사와 더불어 매립지반과 토취장에 대한 토질조사를 실시하여 계획 매립호안의 단면 및 안정성을 검토하여 준설토량을 산정한 후 적정 시공방법을 선정한다. 준설선 선정은 기상, 해상, 지리적 여건, 공사기간, 준설토의 특성, 준설심도, 작업선의 조합 등을 고려하여 결정하게 되는데, 본 공항부지 준설방법은 펌프준설 방식을 사용하였다.

펌프식 준설선(12,000HP)은 그림 3과 같이 배사관을 통해 목적지까지 전송하는 방식으로 설계되었으며 준설작업 능력은 표 3과 같고 배송거리는 당초 약 10km로 설계되었으나 현장 시공시 준설능력이 저하되어 당초설계의 약 40%~90%인 4.2km~9.0km로 변경하였다.

4.3 노반재로 기준

표 3. 준설작업능력

작업능력			평균유율(%)	평균유속(m/sec)	배사관직경(mm)
m/hr	m/day(15hr)	m/mon(23일)			
1,188	17,820	409,860	79.12	4~5	760

표 4. 노반 다짐두께 및 다짐도 관리 기준

구분	활주로,유도로	활주로,유도로 노건부	착륙대(활주로 중심선에서)		도로포장	비고
			75m구간	기타 구간		
다짐도 관리기준	상부 0.3m: 100% 하부 1.7m: 95%	95%	95%	90%	95%	노반두께 : 2 m

표 5. 준설 매립재로 품질관리 기준

구분	포장지역		포장의 지역
	노상	노체	무차리
# 200세 통과량	15% 이하	25% 이하	25% 이하
CBR	10 이상	5 이상	-
소정지수(PI)	6		-

표 6. 대표시료의 물리시험 결과

항목	함수비 (%)	비중	#200세 통과량 (%)	균등 계수	γ_{max} (g/ci)	최적함수비 (%)	실내 CBR	분류	다짐지수 (F)a
범위	4.7~ 24.4	2.65~ 2.66	7.0~10.1	1.5~3.0	1.78~1.80	14.8~15.4	19.1~22.5	SP-SM	0.6~0.7
비고					수정다짐 (D다짐)기준	수정다짐 (D다짐)기준	수정다짐의 다짐도 95% 기준		HIII(1991)로 부터 추정

주) F = $(\theta_{max} - \theta_{min}) / \theta_{max}$ (θ_{max} : 가장 느슨한 상태의 흙의 간극비, θ_{min} : 가장 조밀한 상태의 흙의 간극비)로 대개 F=0.56~2.3의 범위를 가지며 F가 작을수록 다짐이 균만.

준설토가 사용된 공항부지의 노반은 지역에 따라 다르나 대체로 항공기의 이·착륙 및 도로용 노반재로서 사용된 지역으로서 도로의 기능을 발휘하기 위해서는 일정 다짐도 및 다짐두께가 필요하다. 따라서 본 현장은 다음 표 4, 표 5와 같이 지역별 관리기준을 설정하여 관리하였다. 표 4는 본 공항지역 활주로 지역 노상 다짐두께 및 다짐도 관리 기준이고 표 5는 준설 매립재 관리기준이다.

상기 기준에 의거 준설매립 부지의 위치별 및 두께별로 적정 빈도에 따라 품질시험을 실시하였으며, #200세 통과량이 노상(2m)의 경우 15%이하 노체(약 3m)의 경우 25% 이하로 관리하였다.

4.4 준설토 입도특성

원지반에서 채취된 시료는 1차적으로 입도 관리기준을 초과하므로 직접 사용하는 데는 한계가 있다.

따라서 유하거리별 소요입도기준을 만족할 수 있는 관리를 실시하여야 한다. 이에 대해 당현장 준설토대 표시료의 입도특성을 보면 다음 표 6, 그림 4와 같다.

한편 유하거리별 퇴적된 준설토의 입도분포는 그림 5와 같이 심도가 깊어짐에 따라 감소하는 경향을 보이고 있는데 이것은 준설 작업후 초기상태의 값이 양호하다는 것을 보여주는 것이다. 또한 입자의 크기가 클수록 자중침강에 따라 침강속도가 빠르기 때문에 입도분포가 양호하다는 것을 보여주고 있으며 또

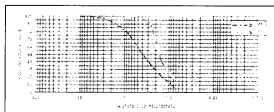
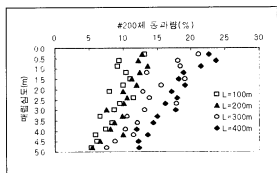
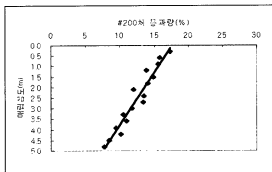


그림 4. 준설토의 대표 입도분포 곡선



(a)심도별 #200체 통과량



(b)심도별 #200체 통과량(평균치)

그림 5. 매립 심도에 따른 입도분포특성

출구로부터의 거리에 따라 그 경향이 유사한 것으로 나타났으며 평균 #200체 통과량은 전 깊이에 대하여 25%미만인 것으로 나타났다.

본 재료에 대해 실내에서 실시한 최대 건조밀도는 1.78~1.80 Ton/m³(수정다짐 D방법)으로서 수정다짐도 95%를 만족하는 최적함수비의 범위는 14.8%~15.4%이나 매립 후 자연상태의 수정다짐도는 최대 건조밀도의 약 85% 수준인 것으로 나타나 지반개량이 필요한 것으로 파악되었으며, 이 때 투수계수는 3~20×10³cm/sec로 파악되었다.

5. 준설토의 다짐특성

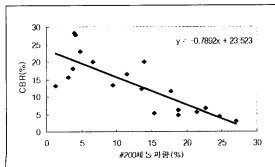


그림 6. #200체 통과량과 CBR의 관계

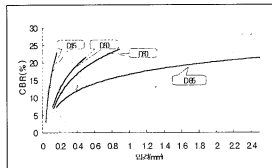


그림 7. 준설재료의 입경과 CBR의 비교

준설토는 노반재료로 사용하기 위해서는 소요의 시방기준을 만족해야 하는데, 본 현장에 사용된 준설토가 시방조건을 만족한 상태에서 CBR 시험값과 입도분포의 관계성을 살펴 보았다. 대체로 그림 6, 7과 같이 #200체 통과량이 작을수록 CBR값이 크게 나타나며, 통과중량 백분율에 대한 입경증가 대비 CBR값의 변화는 민감한 것으로 나타났다.

따라서 지지력비(CBR) 10이상을 요구할 경우, 입경 $D_{85} > 0.25\text{mm}$, $D_{60} > 0.2\text{mm}$, $D_{10} > 0.085\text{mm}$ 일 때 적합한 것으로 보이며 #200체 통과량은 17% 이하일 경우에 이같은 조건을 만족하는 것으로 나타났다. 그러므로 준설토라 하더라도 기본적으로 재료가 갖고 있는 입도특성상 소요의 기준을 만족해야만 지반재료로서 사용이 가능한 것이다.

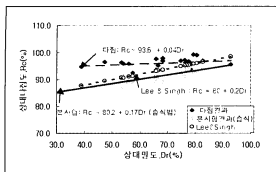


그림 8. R_c와 D_r의 상관 관계

한편, 상대밀도(D_r)와 상대다짐도(R_c)와의 관계를 살펴보기 위해 다음 식을 이용하여 그림 8에 나타내었으며, 이때 Lee & Singh(1971)⁴⁰⁾이 제시한 입상도의 R_c와 D_r의 상관관계식 $R_c = 80 + 0.2 D_r$ 를 함께 본 실험의 습식법에서 얻은 data와 비교한 결과, R_c와 D_r의 상관관계는 $R_c = 80.2 + 0.17 D_r$ 로 나타나 종래 연구결과와 매우 유사한 경향을 보이고 있어, 상대밀도에 의한 다짐관리도 가능한 것으로 나타났다.

$$R_c = \frac{R_s}{1-D_r \times (1-R_s)}, \text{ 여기서 } R_s = \frac{\gamma_{min}}{\gamma_{max}}$$

또한 그림 8, 그림 9를 종합 분석해 보면 #200체 통과량이 증가할수록 상대밀도(D_r)와 상대 다짐도(R_c)가 저하되고 결국 최대진밀도가 감소하게 되는데, 이것은 #200체 통과량이 클수록 단위체적당 함유량이 높아 Sponge현상이 발생하여 다짐성이 떨어지는 점성토 지반이나 실트질 지반과 유사한 경향을 보이고 있다. 즉 사질토지반이라 할지라도 미립자와 물이 일정량이상 함유될 경우 흙입자의 전단거동은 Interlocking 현상에 의해 지배받기 보다는 Ball Bearing 현상에 지배되어 전단강도를 저하시키게 되는데 본 시험결과도 이같은 차원에서 낮아진 것으로 판단된다.

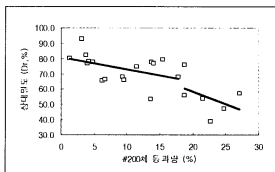


그림 9. #200체 통과량과 D_r(%)와의 비교

6. 준설지반 개량

준설매립토는 물과 토사의 혼합유체 속에서 토사를 침강·퇴적시켜 새로운 지반을 형성하는 재료로서 퇴적시 환경에 따라 다양한 특성을 나타낸다. 이때 토립자의 침강, 퇴적이 수중에서 이루어지므로 토립자의 낙하에너지가 작아 느슨한 상태의 빈입도 지반을 형성하기 쉽다. 이같은 지반조건에서 지반개량 공법은 여러 종류가 있으나, 주로 다짐 대상층인 준설매립토가 3m~5m 두께로 분포하고 있어 다짐공법 선정이 제한적이고 또한 진술한 바와 같은 빈입도 지반에 대한 효과적인 다짐 방법은 잘 알려져 있지 않은 상태이다.

따라서 다짐지수(Compactability Index)가 0.6~0.74의 범위로서 다짐이 매우 곤란한 본 지역 준설매립토의 개량에 대하여 효과적이고 경제적인 공법을 제시하기 위해서는 본 공사 실시예정지역에서의 시험시공이 필수적이다. 시험시공은 세립분 함유량이 비교적 적은 조립/빈입도의 지반이 주요 대상이므로, 지반의 특성 및 국내의 사례들을 조사하여 동 다짐(Dynamic Compaction), 유압식햄머다짐(Hydraulic Hammer Compaction) 및 대형 진동햄머다짐(Mammoth Vibro Tamping Compaction) 외에 총다짐등 4종류의 방법에 대해 적용가능성을 비교 검토하였다.

6.1 시험시공

시험시공 위치는 적정 다짐두께, 연약지반개량 후 원지반의 개량정도, 지하수위 위치 및 Trafficability 등을 고려하여 부지중 다짐조건이 가장 불리한 지역을 선정하였고 부지규모는 다짐장비의 운행이 가능하고, 각 공법간의 동적영향이 최소화 될 수 있도록 적절한 이격거리를 두고 실시하였다(그림 10).

그리고 준설매립층과 원지반의 정밀조사를 위해 현장 원위치시험 7종 1864회와 실시시험 7종 652회를 실시하였으며 느슨한 준설매립층의 개량효과 파악을 위해 침하관, Screw식 침하봉, 공기식 간극수압계, 지하수위계 등 8개의 계측기를 설치하여 측정하였다.

6.2 지반개량 공법 종류

본 현장 시험시공에 적용된 각 공법별 특징을 보면 다음과 같다.

1) 층다짐 공법

층다짐은 1930년대 Proctor, Hogentogler를 시작으로 Hilf(1956), Lambe(1960), D' Appolonia(1969)

등을 거쳐 발전해 왔으며 가장 널리 쓰이는 공법이다. 그 원리는 노상 다짐을 위하여 중무게의 Roller를 이용하여 시방에서 정한 규정의 두께로 층다짐하는 방법이다. 1회 다짐두께(Lift Thickness)가 대부분 50cm 이하로서 층이 두꺼울 경우 여러번으로 나누어 다짐을 시행한다. 따라서 층다짐 공법은 준설매립토의 두께에 크게 영향을 받지 않을 것으로 판단된다. 그러나 준설매립층의 두께가 얇을 경우 다짐 장비의 운행에 의하여 원지반이 심하게 교란될 수 있으므로 최소한 다짐층 하부에 준설매립토 1m 정도를 확보하고 층다짐시 지하수의 배제가 용이한 지역을 선정해야 한다. 층다짐은 일반적으로 많이 사용되는 10ton진동다짐 Roller를 사용하였으며 층다짐 시공 단면은 다음 그림 11과 같다.

2) 동다짐 공법

동다짐은 L.Menard(1975)에 의하여 개발되고 Gambin, Mayne, Lukas, Welsh 등에 의하여 발전되어 지금까지 널리 사용되어 온 비교적 두꺼운 지반을 신속하고 간단하게 다짐 수 있는 공법이다. 다짐층의 무게 및 낙하 높이를 조합하여 다짐에너지를 비교적 다양하게 조절하는 것이 가능하며 본 현장 시험시공 공법중 가장 깊은 심도까지 개량이 가능한 공법

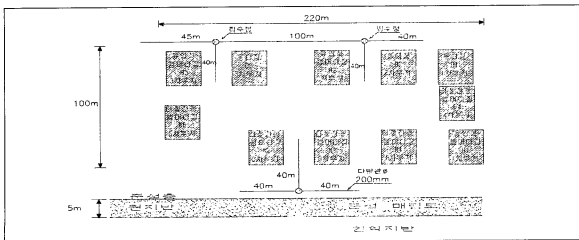


그림 10. 다짐시험시공 공법별 배치도

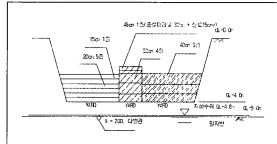
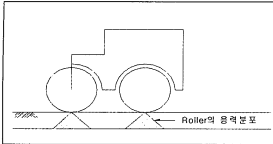


그림 11. 층다짐 공법 및 시공 단면도

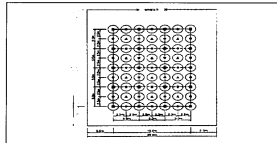
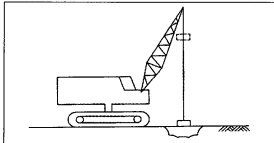


그림 12. 동다짐 공법 및 타격 Pattern도

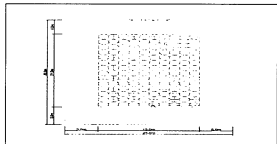
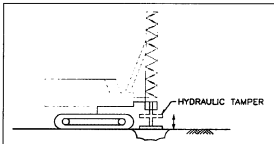


그림 13. 유압식 햄머다짐 및 타격 Pattern도

이다. 따라서 동다짐은 준설매립토의 두께는 5m 이상 이 되도록 하였다. 동다짐에서 사용되는 일반적인 장비조합은 Crane 80Ton과 다짐용 추 및 Dozer이다. 시험 부지에서의 타격 Pattern도는 그림 12와 같다.

3) 유압식 햄머다짐 공법

유압식 햄머다짐은 그 원리가 동다짐과 동일하나

낙하고 및 다짐판의 무게 등이 적어 다짐에너지에 차이가 있다. 유압 햄머의 다짐에너지는 일반적으로 동다짐보다는 작고 층다짐 및 대형 진동햄머다짐보다는 큰 것으로 알려져 있다.

본 공법은 영국에서 개발되었으나 널리 사용되지 못한 관계로 다짐영향 심도 등이 상세히 알려져 있지 않으며, 군장사입기지 준설매립도에 적용된 사례보고에 따르면 지표로부터 4~5m 심도까지는 비교적

양호한 개량결과가 나타난 것으로 보고된 바 있다. 따라서 본 시험시공에서는 본 공법의 개량심도를 최대 5m로 취하여 준설매립층의 두께가 5m 내외인 부지를 대상지역으로 하였다. 시험시공시 유압식 햄머 다짐 장비는 크레인 80ton, 100ton, Hydraulic hammer는 7ton~10ton, Bulldozer규격은 19ton을 사용하였다. 이는 충다짐과는 달리 고공에서 다짐 추를 낙하시키지 않고 비교적 짧은 거리에서 중량의 Tamper(7ton, 10ton)를 낙하시켜 Tamper 하단의 Foot를 지표면에 타격하여 그 충격력으로 지반을 개량한다. 따라서 신속하고 정확한 반복 타격이 가능하며 타격 Pattern은 그림 13과 같다.

4) 대형 진동햄머다짐 공법

대형 진동햄머다짐은 우력을 가진 회전질량이 회전할 때 발생하는 진동을 활용하여 지반을 다지는 공법으로서 그 개량심도는 진동햄머의 진동력 및 다짐판의 크기에 좌우된다(그림 14).

이 방법은 주로 일본에서 매립토 다짐에 사용되었던 방법이며 개량심도는 이론적으로 도출되기 보다는 경험적인 방법이 사용되고 있다. 일반적으로 사용되는 개량심도는 1.5m~5.0m 정도이며 시험시공은 일본 KANSAI 국제 공항에서 사용된 약 5m의 개량심도 장비와 동등한 장비를 사용하여 개량심도를 약 5m 내외로 하였다.



그림 14. 대형 진동다짐장비 전경

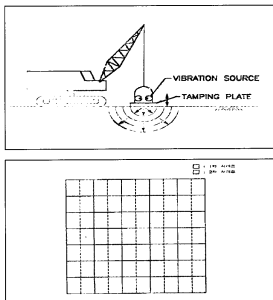


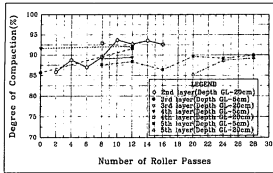
그림 15. 대형 진동햄머다짐 및 타격 Pattern도

6.3 지반개량 결과

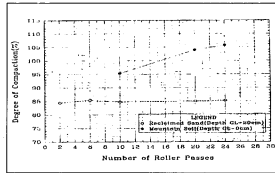
1) 충다짐 시험시공 결과

충다짐 시공으로부터 다짐관리 기준을 만족하는지 여부를 판단하기 위해 전압회수에 따른 다짐밀도의 관계성을 평가하였다(그림 16(a)). 시험시공은 전압회수와 충다짐 두께를 달리하여 입상도와 준설토로 구분하여 실시하였으며, 시험결과 전압두께와 전압회수에 따른 에너지와 관계없이 최대 다짐도는 관리기준값의 92~94%수준에 머무르는 것으로 나타났다. 따라서 전압회수를 10~16회까지는 다짐도가 증가하는 경향을 보이나, 그 이후는 전압회수를 계속 증가시켜도 다짐도의 증가현상은 보이지 않았다. 따라서 준설매립토 노상의 목표 다짐도 95%에 미달하는 현상을 나타냄에 따라 준설토를 일반 성토용 충다짐용으로 활용하는 것은 무리가 있는 것으로 나타났다.

한편 준설 매립토가 노반용 성토 다짐재로 활용되지 못하는 점을 감안하여 일반 성토용 매립재와 비교 시험을 실시한 결과 그림 16(b)와 같이 일반 성토재



(a) 다짐회수에 따른 다짐도



(b) 준설토와 입상토의 비교

그림 16. 층다짐 결과

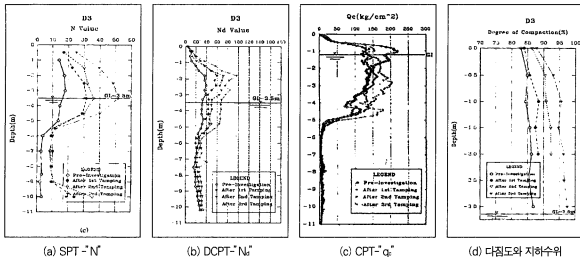
의 다짐도는 다짐 에너지를 증가시킬 경우 최대 106%까지 도달하였으나 준설 매립재는 85%수준인 것으로 나타났다. 따라서 세립분이 적고 빈입도인 본 준설매립토의 특성상 다짐지수가 낮아 본 과정에서 사용된 장비로 이용한 층다짐으로는 노상의 다짐목표인 다짐도 95%의 확보가 어려운 것으로 평가되었다.

2) 동다짐 시험시공 결과

시험시공에 따른 지반개량정도는 통상적으로 다짐 관리 기준에 의거 노반 지반으로서 그 적정성을 판단

하게 되는데 당 현장은 3종류의 동다짐 시험에 대해 1차적으로 실제 다짐밀도 값으로부터 다짐정도에 의거 자연상태와 지반개량후 개량정도를 파악하였으며 이를 위해 다짐확인시험으로 현장 들밀도시험과 상대밀도 시험, RI시험을 실시하였으며 더불어서 지반의 선단 관입으로부터 관입저항 관리기준을 제시하고자 표준관입시험과 동적관입시험 그리고 피에조 큰 시험을 실시하였다.

당 현장은 관리기준의 정도를 높이기 위해 3종류의 공법별 시험결과를 비교 분석하였다. 당 현장에서



(a) SPT-N'

(b) DCPT-Nu'

(c) CPT-qc'

(d) 다짐도와 지하수위

그림 17. 동다짐에 따른 지반조사자료의 변화

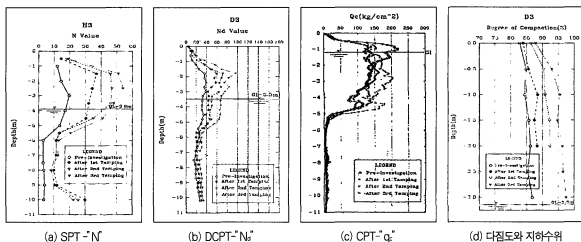
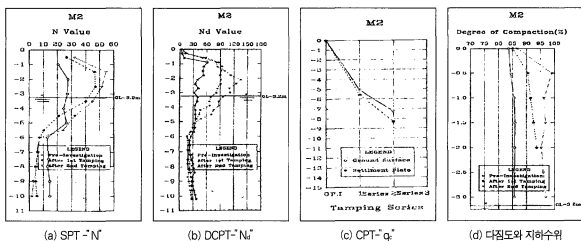


그림 18. 유압식 햄머다짐에 따른 지반조사자료 변화



주) 대형 진동햄머다짐은 CPT- q_a 를 실시하지 않았음.

그림 19. 대형 진동햄머다짐에 따른 지반조사자료 변화

실시한 다짐공법별 시험결과를 보면 각각 그림 17, 그림 18 및 그림 19와 같다.

상기 시험방법에 의거 3종류의 각 공법별 개량된 범위내에서 다짐 전후의 개량정도를 개략적으로 정량적인 값으로 나타내면 다음 표 7과 같다.

상기 결과로부터 지반다짐 개량공법은 동다짐공법의 경우 가장 깊은 심도까지 개량이 가능한 것으로 나타났으며, 장비 및 시공법 조절로 보다 깊은 심도

까지 개량가능하므로 목표 개량심도가 큰 경우에 바람직한 것으로 판단되었고, 유압식 햄머 다짐공법의 경우 4.2m~5.4m까지 효과적으로 다짐 수 있는 것으로 나타났으나 두께가 5m 이상인 경우는 유압햄머 중량을 증가시켜 회당 타격에너지를 증가시켜야 할 것으로 판단되었다.

그리고 대형 진동 햄머다짐 공법의 경우 4.5m 두께까지 다짐 수 있는 것으로 나타났으나, 지하수위가 높

표 7. 각 공법별 개량효과

공법	표준관입시험(N)		동적콘관입시험(N _v)		다짐도(%)		간극비		개량심도 m	매립토두께 m	교란심도 m
	다짐전	다짐후	다짐전	다짐후	다짐전	다짐후	다짐전	다짐후			
돌다짐 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	4.8~5.4	5.2~5.5	1.3
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	4.2~5.4	5.2~5.6	1.0
대형진동햄머 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	4.2~4.8	5.0~5.6	0.7

주) 1: GL-3.0m까지 평균입 (상부 교란심도 제외)

고 준설매립토 두께가 얇은 경우에는 적용성이 떨어지는 것으로 나타났으며, 본 공사에 적용할 수 있는 최적공법은 유압식 햄머다짐공법으로 판단되었다.

부가적으로 대형진동햄머 다짐공법도 발전기 등과 같은 부대장비를 일체화시키고 Tamper의 타격점에 대한 정확성 및 진동시 Tamper의 이동방지 등을 연구 보강하면 사질토 지반에서 상당히 효과적인 다짐공법으로 사용될 것으로 평가되었다. 이상과 같이 단순히 지반개량 효과로부터 개량공법을 선정하는 것은 개량정도가 유사하기 때문에 곤란한 것으로 나타났으나 다짐에 따른 지반진동문제와 경제성 등을 종합적으로 비교 분석한 결과 유압식 햄머다짐시공 방법이 가장 적절한 것으로 판단되었다.

6.4 품질관리기준 설정

기왕에 퇴적된 준설토의 매립심도가 깊어 성토 다짐

관리가 곤란한 경우 이에 대한 대안으로 관입시험을 이용해 다짐관리 기준을 설정하게 되는데, 이같은 이유는 고풍수비를 소유한 준설토를 충다짐하는 것이 불가능하기 때문이다. 이때 관입저항을 통해 지반다짐도를 간접적으로 평가할 수 있다. 이에 각 시험방법별 현장다짐도의 상관관계를 나타낸 것이 그림 20, 그림 21, 그림 22이다. 시험방법별 현장다짐도의 상관성은 피에조론 시험 관계성이 비교적 높게 나타났으며, 관리기준은 현장 다짐도 90%의 저항값은 14 Mpa이며, 95%의 저항값은 20 Mpa 인 것으로 나타났다.

이에 비해 표준관입시험과 동적 콘관입저항값의 상관성은 피에조론 시험치에 비해 다소 떨어지는 것으로 나타났다. 그러나 현장 관리시 필요에 따라 병행하여 관리하는 것이 타당하다고 판단하여 그 기준을 설정하였다.

그리고 상대밀도와 콘관입 저항과의 상관관계를 비교 평가하고자 기존 제안식과 본 시험결과를 종합

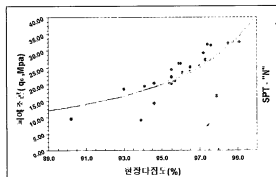


그림 20. 현장 다짐도와 q_c의 상관관계

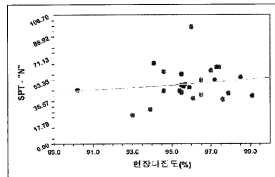


그림 21. 현장다짐도와 N-Value의 상관도

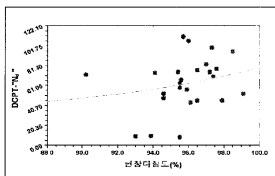
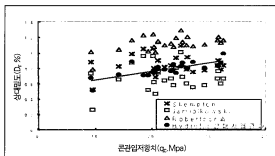
그림 22. 현장다짐도와 DCPT-N₁₀와의 상관도

그림 23. 상대밀도와 콘관입시험의 상관도

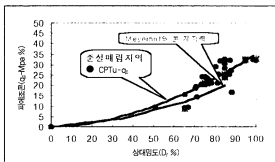


그림 24. 상대밀도와 콘관입시험의 상관도

표 8. Meyerhof에 의한 N - D - q의 관계

모래의 상태	상대밀도 (D)	N치	점적콘저항(Mpa)
매우느슨	<0.2	4	2
느슨	0.2~0.4	4~10	2~4
보통	0.4~0.6	10~30	4~12
조밀	0.6~0.8	30~50	12~20
매우조밀	>0.8	>50	>20

표 9. 준설매립지반의 품질관리기준 설정

구분	콘관입	표준관입	동적콘관입	비고
	저항치(q)	저항치(N)	저항치(N _d)	
노상	15Mpa	40	80	노상상부 30cm까지
노체	20Mpa	30	60	

하여 나타낸 결과가 그림 23인데 Robertson 등의 값은 비교적 높게 나타났으나 Jamiolkowski 와 Skempton의 제안식은 그 편차가 큰 것으로 나타났다. 그림 23으로부터 상대밀도 0.8인 경우의 관입 저항값은 약 25Mpa로 나타났다. 한편 Meyerhof의 N-Value와 상대밀도 그리고 정적콘저항과의 상관관계를 통해 본 실험결과를 비교하여 보면 그림 24와 같다.

그림 24의 콘관입저항치(q)는 Meyerhof의 제안치와 유사한 경향을 보이고 있는데 현장다짐도 90~95%범위에 해당하는 상대밀도를 Meyerhof의 상대밀도 분류와 비교한 결과 조밀한 상태인 0.55~0.75범위에서 콘관입저항치(q)는 12~21Mpa로 나타났으며, 이에 해당하는 표준관입시험값은 30~50으로 분류된다. 이에대한 관리기준을 요약하면 다음 표 9와 같다.

7. 결론

인천 국제공항 현장 해상준설토의 도로 및 공항 노반재로서 사용 적정성을 판단하기 위해 실내에서 실시한 다짐특성 및 현장 시험시공 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 준설토를 노반재로서 사용하기 위해서는 우선 소요입도 기준을 만족해야 다짐재로서 사용이 가능하며, 본 재료에 대한 실내시험 결과 최대 건조밀도는 1.78~1.80t/m³ 최적함수비는 14.8%~15.4%로 나타났고, 매립후 자연상태의 수경다짐도는 최대건조밀도의 약 85%로서 지반개량이 필요한 것으로 파악되었다.
- 지반 개량결과 빈입도의 재료는 층다짐 공법으로는 노상 다짐도 95%를 만족시킬 수 없는 것

으로 나타났으며, 동다짐 공법 중, 다짐에 따른 지반진동문제와 경제성 등을 종합적으로 비교·분석한 결과, 유압식 햅머다짐 공법이 최적 공법으로 선정되었다.

- 관입시험 중, 피에조콘 시험방법이 비교적 신뢰성이 높은 것으로 나타났으며, 이때 시험값은 관리기준상 현장 다짐도 90%의 저항값은 14Mpa이며, 95%의 저항값은 20Mpa인 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 김영웅, 김용철, 김중국, (1999), "준설매립토의 다짐관리 방법에 관한 고찰", 한국지반공학회지, Vol. 15, No.2, pp. 11-17
2. 김영웅, 김용철, (2000), 인천국제공항(IIA)의 다짐시험 시공 결과 및 적용", 한국지반공학지
3. 김영웅, 박기순, 손형호, 김중국, (1999), "준설토를 이용

한 지하구조물 뒷채움의 다짐특성에 관한연구", 한국지반공학회 기술발표회 논문집, pp. 357-364

4. 건교부, (1992), 수도권 신공항부지조성 실시계획 보고서
5. 건교부, (1992), 수도권 신공항부지조성 토질조사 보고서
6. 신공항건설공단, (1996) 수도권 신공항 다짐시험시공 요약보고서
7. 인천국제공항공사, (2000), 부지조성공사 건설지
8. 토지개발공사, (1991), 해안매립기술에 관한 연구
9. 關西國際空港(株) 公務一部 企劃課長 日田登, 公務一係長 北村昭二 : 埋立地の 地盤改良, Airport Review, 平成4年
10. 日本運輸省航空局, (1990), 空港 アスファルト 舗装構造 設計要領
11. 日本運輸省航空局, (1990), 空港 コンクリート 舗装構造 設計要領
12. AFM, Chapter 2 Air Field Criteria, 86-8
13. D.C Moorhouse & G.L Baker, (1969), "Sand Densification By Heavy Vibratory Compactor", ASCE, SM4

상업광고

Dr D. Chan교수 초청 세미나

2001년 Canadian Geotechnical Conference의 Keynote Lecturer인 캐나다 University of Alberta 대학의 Chan 교수를 모시고 "지반공학에서의 수치해석의 적용"이라는 주제로 초청강연회를 열고자 하오니 회원 여러분의 많은 참여 부탁드립니다.

1. 일 시 : 2001년 12월 11일(화) 14:00~17:30
2. 장 소 : 서울 시립대학교 자연과학관 1층 대회의실
3. 참 가 비 : 무료
4. 주관 및 후원 : 서울시립대학교, 현대산업(주), 두우건설 엔지니어링
5. 문 의 처 : 건양대학교 토목공학과 이 규 환(041-730-5337, khlee@konyang.ac.kr)