

인천국제공항 연약지반의 활주로 포장시공 사례연구

A Case Study for Airfield Pavement Construction on Soft Ground at Incheon International Airport

최인걸* · 박태순** · 김영웅*** · 성낙일****

1. 서론

인천국제공항 지역은 1,700만평중 1,400만평이 연약점토층으로 구성되어 있고 활주로, 여객계류장 등 주요시설물을 시공하기 위하여 영종도와 용유도 사이의 간석지일대를 남·북측 방조제를 공사하면서 동시에 12,000~20,000Hp의 대규모 펌프준설선을 이용하여 바다에서 준설한 모래를 원지반토 위에 매립하여 공항부지를 조성하였다.

본 논문에서는 인천국제공항지역의 원지반에 대한 조건 및 특성을 살펴보고, 고품질의 포장시공을 실시하기 위하여 연약한 지반을 개량한 내용, 지반개량 완료후 포장체 하부의 노상 및 노체에 해당하는 준설매립층을 다짐시공한 내용 및 다짐공사 완료후 포장하중과 항공기 중량으로 인한 포장의 안전성 확보를 위하여 포장 시험시공을 실시하고 그 결과를 본 공사에 적용한 사례등을 활주로 포장공사와 연계하여 기술하고자 한다.

2. 지반조건 및 특성

인천국제공항의 부지 1,700만평중 해수부 1,400만평은 표준관입시험 $N < 5$ 이하의 평균심도가 5m(최대 11.5m) 두께인 해성점토층으로 형성되어 있으며, 연약지반의 특성을 알기 위하여 사용한 현장조사 시험장비는 현장 베인(Geonor Vane), 피에조콘관입시험(CPT), 딜러토미타시험(DMT), 공내재하시험(PMT)장비 등이다. 지반 조사결과를 토대로 해외공항과 비교한 지반조건은 표 1과 같으며 인천국제공항의 경우 해외의 해상 연약지반에 건설된 홍콩공항, 간사이공항, 창이공항 등의 연약층에 비해 비교적 양호한 지반임을 알 수 있다.

특히, 일부 지역의 하부층에서는 Sand Seam이 널리 분포하고 있어서 연약지반개량을 위한 프리로

* (주)유신코퍼레이션 인천국제공항 공항토목시설공사감리단 기술본부장

** 서울산업대학교 토목공학과 조교수

*** 인천국제공항공사 건설시험소 소장

**** (주)유신코퍼레이션 인천국제공항 공항토목시설공사감리단 단장



딩(Pre-loading)재하시 압밀은 당초 예상 실내시험 결과보다 상당히 빠르게 진전되었으며 점토의 투수계수는 $a \times 10^{-5} \sim 7 \text{cm/sec}$ 인데 비해 Sand Seam의 투수계수는 $a \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 이므로 Sand Seam의 투수성은 점토에 비해 약 100배의 투수성을 가진 것으로 나타났다. 활주로 포장하부의 지층구성은 상부에서 하부를 향하여 준설매립층, 상부해성층, 상부충적층, 하부해성층, 하부충적층, 풍화잔류토 및 암반으로 형성되어 있다.

표 1. 국내·외 해상공항 지반조건 비교

구 분	국내지반		해외 해상공항		
	인천국제공항	평양제철소	홍콩공항	일본간사이공항	싱가폴창이공항
평균 수심 (m)	1	2	10	18	4
연약층두께 (m)	0~11.5	5~25	15~20	16~20	14~15
평균매립성토고 (m)	5.3	7.5	15	22	9.5
평균매립토량(m ³ /m ²)	5.8	9.0	17.5	33.5	10.3

3. 연약지반개량공사

연약한 지반 위에 시공되는 활주로 포장공사는 제1, 제2 활주로가 있고, 제1 활주로는 '93. 12월에 착공하여 2000. 11월 완공예정, 제2 활주로는 '93. 12월에 착공하여 2000. 12월 완공계획이며 여기서는 제1 활주로 포장시공사례에 대해서만 언급하고자 한다. 활주로 포장규모는 길이(L) 3.75km, 포장 폭(B)은 84m(본 포장은 60m, 노면 좌, 우측 각 12m)이며 활주로 말단부 이륙 대기구간(길이 300m)과 블라스트패드(길이 120m)구간의 콘크리트포장을 제외한 나머지 구간은 아스팔트포장이다. 연약지반에 작용하는 하중은 항공기하중(최대축하중 P=114.3ton), 포장하중($rt \times t = 2.1t/m^3 \times 1.05m$), 노상하중($rt \times t = 1.9t/m^3 \times 2.0m$), 노채하중($rt \times t = 1.8t/m^3 \times 3.0m$)이다.

따라서 연약지반에 상기에서 언급된 하중을 고려한 설계 예상침하량을 계산한 결과 상부해성층(N<5)의 경우 32.6~63.9cm로서 활주로 허용잔류침하량(상부해성층: 2.5cm, 하부해성층: 5.0cm)인 7.5cm를 초과하므로 지반개량이 필요하였으나 하부해성층의 침하량은 대부분 허용잔류침하량 이내에 들어가므로 지반개량 대상심도에서 제외하는 것으로 설계하였다. 따라서 상부해성층을 대상으로 한 연약지반개량 본 공사에 앞서 최적의 지반개량공법을 선택하기 위하여 시험시공을 실시하였고, 시험시공 성토는 다음과 같이 4단계로, ① 주행성(Tafficability) 확보를 위한 평균 두께 1.5m로 준설매립, ② Sand Mat 포설(1.2m)후 연직배수재 타설과 계측기 매설, ③ 계획된 지반고까지 1.8m두께의 준설매립, ④ 프리로딩 평균높이 7.5m을 일정기간 재하하는 순서로 실시하였으며, 연직배수재는 ① SD, ② PBD, ③ SCP, ④ Pack Drain 공법을 적용하였다.

시험시공시 매설한 지표면침하판, 층별침하계 및 간극수압계 계측결과 프리로딩 재하에 의한 압밀침하의 거동은 Well Resistance, 응력집중(Archiving Effect), Smear Effect 등의 영향요소와 Sand Seam의 발달로 인해 공법별로 매우 비슷하며 압밀축진 효과 또한 유사한 것으로 나타났다. 따라서 공법별 침하거동은 비슷한 것으로 나타났으나 연직배수재의 성능, 경제성 및 시공성에 대한 비교분석을 한 결과 SD 및 PBD공법이 가장 유리한 것으로 평가되어 본 공사시 이를 적용하였다.

본 공사시에는 지반거동을 분석하기 위하여 원지반 위에 지표면침하판을 100m 간격으로 설치하였



고, 해성층과 충적층 사이에는 층별침하계, 각 층의 중앙지점에는 상재하중에 따른 과잉간극수압의 분포를 알기위해 간극수압계를 매설하였으며, 또한 지하수위 흐름 및 프리로딩 사면 거동을 알기 위하여 지하수위계 및 경사계를 200m 간격으로 설치하였다.

계측기 매설이 완료된후 원지반위에 준설매립을 실시하였으며, 원지반 위에 약 3m는 포장하부의 노체에 해당되므로 준설매립토를 No.200체 통과량 25% 이하, 노체 위에 2m는 포장 직하의 노상에 해당되므로 노체보다 좋은 재료인 준설매립토를 No.200체 통과량 15% 이하로 관리하였다. 준설매립 완료후에는 연직배수재(SD 또는 PBD)를 타설하였고, SD를 적용한 구역의 경우 타설직경 400mm, 간격은 2.8×2.8m, 프리로딩 높이는 4.2~5.6m, 재하기간은 평균 6개월이며 PBD를 적용한 구역의 경우 타설간격은 1.6×1.6m~2.0×2.0m, 프리로딩높이는 5.5~7.3m, 재하기간은 평균 6개월이다. 연약지반개량 범위는 활주로 포장구간(활주로 중심으로부터 42m)과 착륙대지역(활주로 포장끝에서 33m)의 허용잔류침하량이 각각 7.5cm(상부해성층 2.5cm, 하부해성층 5.0cm), 15cm(상부해성층 10.0cm, 하부해성층 5.0cm)이므로 단차로 인한 포장체 손상을 방지하기 위하여 포장 노건끝에서 6.0m까지는 허용잔류침하량 7.5cm를 고려한 프리로딩을 재하하였고, 포장 노건끝에서 그외 착륙대지역(27m)은 허용잔류침하량 15.0cm를 고려한 프리로딩을 재하하였으며 활주로 연약지반개량 단면도는 그림 1과 같다.

준설매립, 포장 및 항공기하중 압밀도를 고려한 프리로딩 재하후 계측빈도는 준설매립중에는 2일/1회, 프리로딩 시공중에는 1일/1회, 성토후 1개월은 1일/1회, 1~2개월 3일/1회, 3~4개월 1주/1회, 4개월 이후 2주/1회에 계측을 실시하였다. 프리로딩을 일정기간 재하한 후 이를 제거하기 위한 결정은 지표면침하판, 층별침하계등으로 계측한 잔류침하량이 허용잔류침하량 이내이고 간극수압계로 계측한 과잉수압이 소산되어 수렴되는 것이 확인된 경우에만 프리로딩을 제거하였다.

잔류침하량 추정시 현장에서 계측된 값을 쌍곡선법, 아사오카법, 호시노방법으로 분석한 결과 쌍곡선법이 타 방법에 비하여 잔류침하량이 보편적으로 크게 나타났다. 따라서 쌍곡선법을 적용 할 경우 프리로딩 제거시기가 지연될수 있으나 지층의 불균일성 등을 감안할 경우 타 방법에 비하여 안정적인 방법으로 판단되어 이 방법을 주로 적용하였다.

또한 활주로의 경우 허용잔류침하량 설계기준치는 7.5cm이므로 프리로딩제거시 잔류침하량이 기준치 이내인 경우 제거를 해야하지만 활주로 주변지역은 퇴적층이 불규칙하고 또한 향후 하부해성층에 2차 압밀침하가 우려되어 상부, 하부해성층을 포함한 잔류침하량이 2.5cm 범위 이내인 경우에만 프리로딩을 제거하였으므로 포장공사 완료후 항공기하중이 작용한다 하더라도 지반변위는 극히 미미하도록 안정적으로 지반개량을 실시하였으며 인천국제공항과 해외공항의 침하량 및 연약지반개량 적용공법 비교는 표 2와 같다.

표 2. 국,내외 공항의 침하량 및 연약지반개량공법 비교

구 분	국 내		해외 해상공항		
	인천국제공항	광양 제철소	홍콩공항	일본간사이공항	싱가폴창이공항
침 하 량	0.5m	0.5m~2.6m	2.5m	11.5m	1.8m
허용잔류침하량	2.5cm(활주로)	30~50cm	10cm	150cm	20cm
적 용 공 법	Sand Drain, Plastic Board Drain + Preloading	Sand Drain, + Preloading	연약지반 준설치환	Sand Drain, + Preloading	Paper Drain, + Preloading

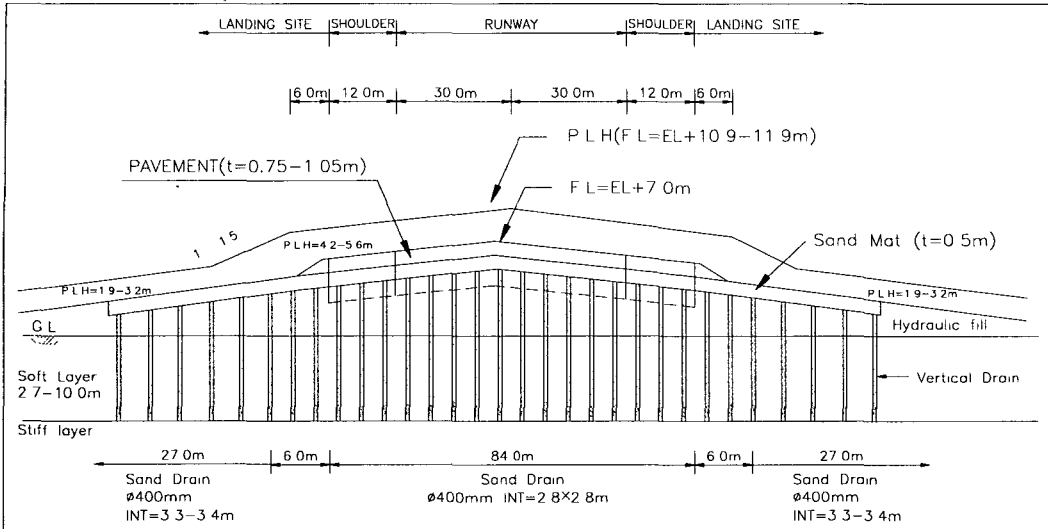


그림 1. 활주로 연약지반개량 단면도

4. 준설매립층 다짐공사

연약한 지반 위에 준설한 준설매립층(SP-SM)은 포장체하부의 노상 및 노체재료로서 품질관리를 하였으나 준설매립층의 두께가 다양하고 또한 준설재료의 입도분포가 균등하므로 설계지리적 확보 및 액상화를 방지하기 위한 적정 다짐공법을 선정하기 위하여 층다짐, 유압식 햄머다짐, 동다짐 및 대형진동 햄머다짐의 4가지 방법으로 시험시공을 수행하였다. 시험시공 결과 층다짐을 제외한 동다짐, 유압식 햄머다짐 공법별 교란심도에 대한 개념도와 준설매립토 개량심도는 각각 그림 2와 표 3과 같다. 또한 다짐공법 선정시 층다짐 공법(다짐도 92% 이하)은 다짐관리기준치인 다짐도 95% 확보가 어려워 평가대상에서 제외하였으며 유압식 햄머다짐, 동다짐, 대형진동다짐 공법을 대상으로 개량심도, 경제성, 시공성등을 비교검토한 결과 유압식 햄머다짐공법이 가장 우수한 것으로 평가되었으며 본 공사시 이를 적용하였다.

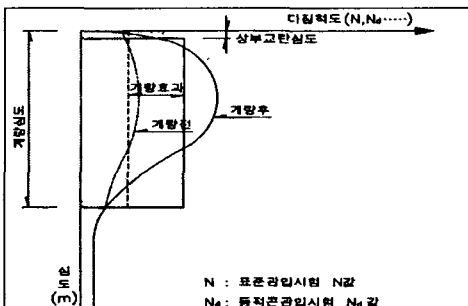


그림 2. 준설토 개량 및 교란심도 개념도

표 3. 시험시공 공법별 준설매립토 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



그림 2 및 표 3에서 살펴본 바와 같이 준설매립토 상단에서 유압햄머 다짐을 실시할 경우 다짐표면으로부터 약 1.0m가 교란되므로 본 공사에서는 준설매립토 상단에서 직접시공을 하지 않고 다짐효과를 높이기 위하여 준설매립토 상단에 추가로 No.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 및 노상의 교란부위 30cm를 제거하고 PP매트 포설후 산토 15cm 두께를 2층으로 층다짐하여 100% 다짐으로 관리 하는 것이 적절한 것으로 평가되어 본 공사시 이를 적용하였다. 유압식 햄머는 직경 1.0m, 중량 10톤의 추를 약 1.2m의 높이에서 20회씩 낙하시켜 준설토를 다지는 방법으로 활주로, 유도로, 계류장, 착륙대 등 총 190만평 전지역을 3차에 걸쳐 그림 3과 같이 다졌다. 이와 같이 유압식 햄머다짐이 완료된 지반의 강도는 CPT시험결과에 의해 노체 15Mpa (SPT 30 이상), 노상 20Mpa(SPT 40 이상) 이상이 되도록 관리기준을 정하였고 본 공사시 이를 적용하였다.

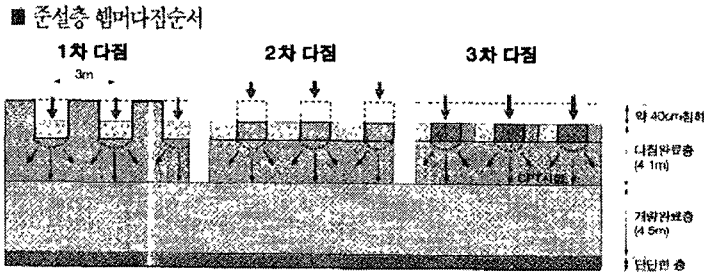


그림 3. 준설매립층 다짐순서

5. 포장시공

5.1 시험시공

활주로포장의 최적 포장공법과 포장단면, 포장재료를 선정하기 위하여 연약지반개량이 완료된 지역 내에 콘크리트포장, 아스팔트포장구간으로 구분하여 타원형 트랙을 만들어 1996년 11월부터 18개월 동안 시험시공을 실시하였다.

시험시공 규모는 타원형의 주행트랙 총 연장 842m의 양쪽 직선구간에 콘크리트시험포장(190m×9m) 7개단면, 아스팔트시험포장(190m×6m) 6개단면 및 곡선부에는 아스팔트포장(652m×6m)구간을 만들었으며, B747-400S(492톤)항공기의 바퀴를 장착한 94톤 중량의 트레일러를 매일 24시간동안 450회씩 4개월간에 걸쳐 45,000회를 주행시키면서 포장상태를 파악하였고, 트랙 곳곳에 설치된 9종 515개의 계측기를 통해서 포장체의 지반거동분석, 내구성 등 포장단면의 안전성을 검증하였다.

5.2 포장시공

유압해머다짐이 완료된 후 준설매립층 상단 노상표면 교란층 30cm를 제거한 후 PP매트를 포설하였



고, 매트 사용목적은 항공기의 반복하중으로 인해 노상 준설토가 보조기층내로 혼합침투하는 것을 방지하기 위하여 사용하였으며 매트의 재질은 폴리프로필렌, 인장강도 127ton/m, 인장신도 10~30 %, 투수계수 $a \times 10^{-2} \sim 3 \text{cm/sec}$, 중량 330g/m² 이상이다. 활주로 포장공사 단계별 시공 순서도는 그림 4 와 같고 활주루에 시공한 연성포장단면은 그림 5와 같다.

포장 표면에는 우기시 수막현상으로 인한 항공기 위험요소를 방지하기 위하여 항공기 주행방향의 횡단방향으로 그림 6과 같이 배수홈(가로 6mm, 깊이 6mm, 간격 37mm)을 그루빙기계로 시공하였고, 그루빙홈에 고이는 물은 노면에 있는 지하배수관으로 흘러 들어가도록 유도하였다. 포장하부의 경우는 포장상부에 지하수위가 형성되지 않도록 지하배수다발관(맹암거, 직경 200mm)을 설치하였으며 매 설치되는 보조기층 하부에 설치하였다. 지하배수다발관의 물은 다발관 횡방향 100m 마다 시공된 횡배수관(300mm) 및 맨홀을 통하여 공항지역내 V형 배수로(대표단면, 저폭: 3m, 상단폭: 21m, 사면구배: 1대3)에 연결되도록 하였으며 연결된 배수로는 공항지역 외 간선배수로를 거쳐 남측, 북측에 있는 방조제배수로 및 바다경계 지점에 시공되어있는 남측, 북측 배수갑문을 통하여 원활한 배수처리가 되도록 하였다.

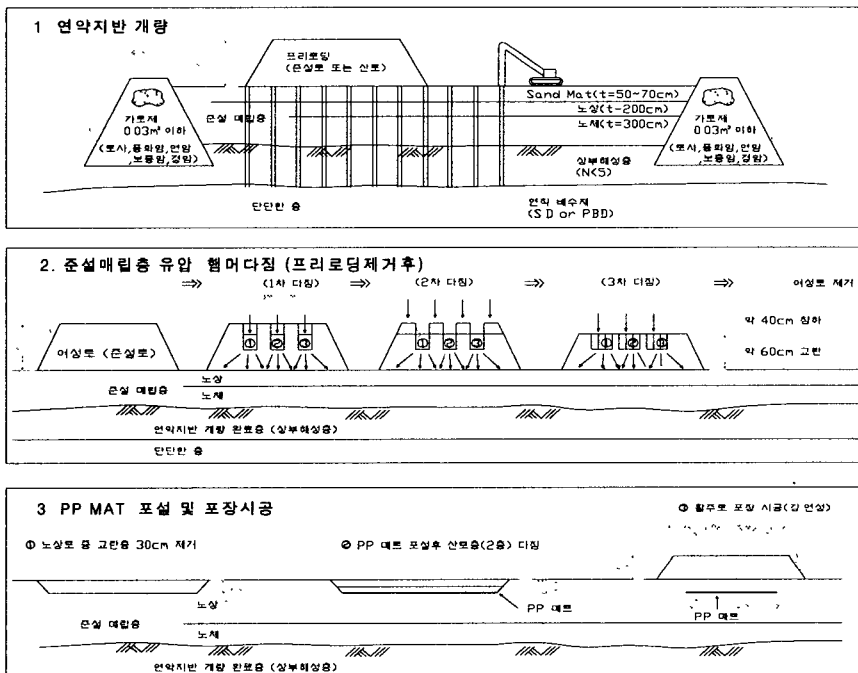


그림4. 포장 시공순서도

6. 결론

1) 활주로 포장을 지지하기 위한 연약지반개량 최적공법을 선정하기 위하여 시험시공 결과에 의

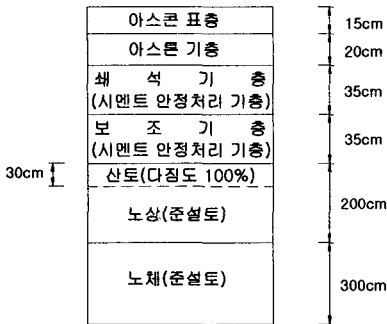


그림 5. 활주로 포장단면도

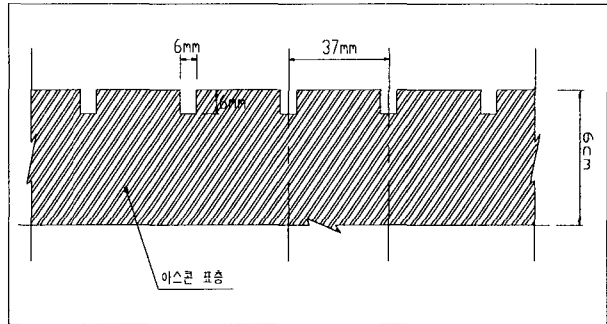


그림 6. 아스팔트포장 그루빙 시공단면도

해 SD, PBD공법을 적용하였다. 포장공사의 내구연한을 증진시키기 위하여는 지반이 연약한 경우 실내시험보다는 원위치 지반조사를 충분히 실시한 후 지반조건에 맞는 시험시공을 실시하고 그결과를 본공사에 반영하는 것이 바람직 한 것으로 판단된다.

- 2) 포장공사 이후에 포장체가 허용잔류침하량 보다 크게 침하되는 것을 방지하고 연약지반의 거동을 정확히 판단하기 위하여 지표면침하판, 층별침하계로 침하거동을 분석하였고, 지층 중앙에는 상재하중에 의한 과잉간극수압분포를 알기 위하여 간극수압계 및 지하수위계를 200m간격으로 매설하여 프리로딩 재하기간동안 지반거동분석이 항상 가능하도록 하였다.
- 3) 프리로딩을 제거하는 방법에는 목표침하량기준, 압밀도기준, 허용 잔류침하량기준등이 있으나 목표침하량, 압밀도기준은 퇴적지층이 불규칙한 경우 지반이 적정하게 개량되었는지 판단하기 어려우므로 본 현장은 어느 지점에서든 허용 잔류침하량이 2.5cm 이내가 되도록 관리하는 허용 잔류침하량 기준에 의하여 프리로딩을 제거하였다.
- 4) 연약한 지반의 지층개량을 완료한 후에는 포장하부의 준설매립재료에 대한 강도를 증진시키기 위하여 유압햄머다짐을 실시하였고 또한 활주로 포장을 충분히 지지토록 하기 위하여 다짐에 의해 교란된 노상(준설토) 교란구간 30cm를 제거하고 PP매트를 포설하므로써 안정된 포장 상태를 유지할 수 있었다.
- 5) 우기시 수막현상으로 인한 항공기 위협요소를 방지하기 위하여 포장표면에 그루빙홈을 만들었으며 포장체 하부에는 지하배수관을 만들어 우기시 원활한 배수처리가 되도록 하였다.

참 고 문 헌

1. 신공항건설공단(1995. 12) "수도권신국제공항·부지조성공사 시험시공 관리용역 종합보고서"
2. 신공항건설공단(1996. 3) "수도권신국제공항 다짐시험시공 용역 종합보고서"
3. 신공항건설공단 (1998.5) "인천국제공항 포장시험시공용역 종합보고서"
4. 최인걸(1998), "인천국제공항 준설매립 시공사례" 한국지반공학회 학술발표회, PP88~92