

인천국제공항 수직배수공법 시험시공 사례연구 A Case Study on Test Embankment using Vertical Drain Method at Incheon International Airport

권오현¹⁾, Oh-Hyun Kwon

¹⁾ (주)한석엔지니어링, HANSEOK Engineering Consultants Co., Ltd

SYNOPSIS : The generally known vertical drain methods for improvement of soft ground are Sand Drain, Sand Compaction Pile, Plastic Drain Board, and Pack Drain. Recently, Plastic Drain Board method application in soft ground is widely used.

In this case study, it is compared with each other vertical drain methods from the results of monitoring and test embankment.

The results of the analysis and the study show that Plastic Drain Board method is relatively acceptable as vertical drain method.

Key words : Preloading, Sand Drain, Sand Compaction Pile, Plastic Drain Board, Pack Drain

1. 서론

연약지반의 지반개량시 일반적으로 적용되고 있는 수직배수공법은 Sand Drain, Sand Compaction Pile, Plastic Drain Board, Pack Drain등이며, 최근에는 시공성, 경제성 및 품질관리 측면에서 유리한 Plastic Drain Board 공법을 이용하는 경우가 증가하는 추세에 있다. 본 사례연구에서는 각각의 연약지반 대책공법에 대한 시험시공 및 계측결과를 토대로 각 공법별 장단점 비교, 문제점, 경제성 및 시공성에 대한 검토를 통하여 향후 설계시나 시공시에 유용한 자료를 제공하고자 함에 그 목적이 있다.

2. 시험시공 개요

2.1 시험시공위치

본 사례연구에 이용된 연약지반 개량을 위한 수직배수재 타설 시험시공위치는 인천직할시 중구 영종도와 용유도 사이의 간석지 일대인 인천국제공항 활주로 남부지역으로 선정하였으며 다음과 같은 기준을 적용하였다.

활주로 또는 중요 구조물이 위치하고, 지층을 대표하거나 상부 해성층이 두꺼운 지역, 투자의 중복을 피하기 위하여 가능한 한 활주로 또는 중요 구조물이 놓이는 위치, 여러 가지 공법을 비교할 수 있도록 시험 부지내에는 가능한 한 지층변화가 없는 지역, 접근성과 경제성, 구조물 완성 후에도 필요시 계측기의 cable을 연장하여 계측할 수 있는 지역으로 선정하였다.

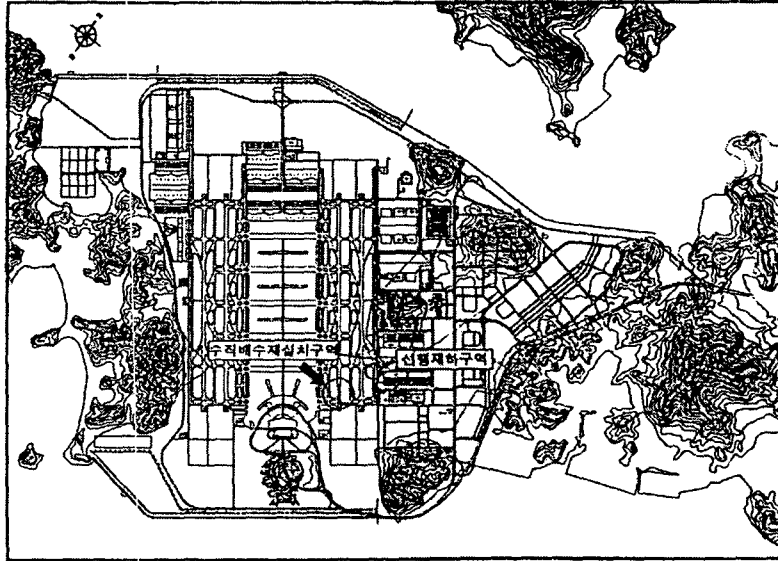


그림 1. 시험시공위치

2.2 대상지반조건

2.2.1 지질 개요

영종도의 지질은 전점의 ⅔이상이 선캠브리아기의 경기편마암복합체로 이루어져 있고, 영종도의 나머지 부분과 용유도, 삼목도는 경기편마암복합체를 관입한 중생대 유라기의 대보화강암으로 구성되어 있고, 그 상부는 이들 암류를 부정합으로 피복하고 있는 퇴적층으로 구성되어 있다.

2.2.2 지층개요

본 연구지역 부지의 전형적인 지층분포는 상부로부터 준설매립층, 상부점성토층, 상부SM층, 하부점성토층, 하부SM층, 풍화잔류토, 풍화암 등의 순으로 나타나며 주요지층의 구성은 다음과 같다.

- 1) 준 설 매립층 : 부지조성시 준설작업에 의한 매립층 (SW, SM)으로 구성되어 있으며 평균 층후는 4~5m 정도이며 N치가 3~20으로 매우느슨~보통조밀한 상대밀도를 보인다.
- 2) 상부점성토층 : 평균층후는 6~10m 정도이며 주로 CL로 구성되어 있으며 평균 N치가 2~10 정도로 연약구간은 N치가 2~3으로 매우연약하다.
- 3) 상 부 SM층 : 지표하 10m 내외에서 존재하며 실트질 모래(SM)으로 구성되어 있다. N치가 20~40의 범위이고 국부적으로 본 층이 나타나지 않는 곳도 있다.
- 4) 하부점성토층 : 상부SM층하에 존재하며 N치가 6~30의 범위로 CL 또는 ML로 이루어져 있으며 상부점성토층에 비해 비교적 굳은 특성을 보인다.

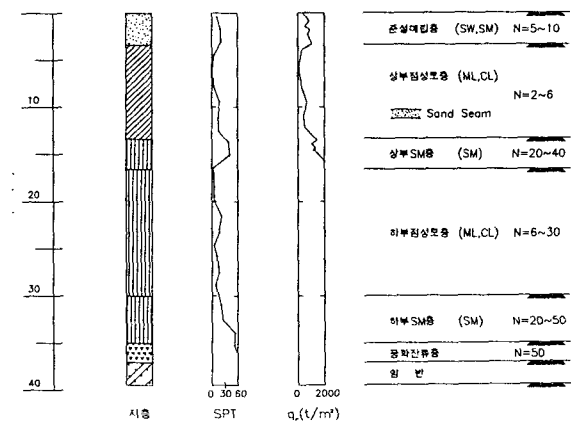


그림 2. 전형적인 지반분포 상황

2.3 적용공법 개요

2.3.1 선행재하 공법 (Preloading)

구조물 시공에 앞서 구조물의 중량과 같거나 그 하중 이상의 하중을 재하하여 기초지반의 압밀침하를 촉진하는 공법으로 지반의 강도증가를 꾀하고 침하량과 강도가 기대치에 도달한 것을 확인한 후 구조물을 건설하는 공법이다. 선행재하에 의하여 침하기간을 줄일 수 있으며, 이 공법의 적용범위는 연약층이 두껍지 않거나 점토층내에 Sand Seam이 발달한 경우이다.

2.3.2 모래말뚝 공법 (Sand Drain)

직경 300~400mm의 모래말뚝을 지중에 형성, 배수거리를 짧게 하여 압밀을 촉진시키는 공법이며, 타설간격은 2.0~2.5m가 가장 많다. 본 공법은 시공시 넥킹(necking)현상이 발생하여 배수를 차단하거나 비교적 큰 변형이 발생할 경우 모래기둥의 절단가능성이 있고, 주변 지반의 교란이 비교적 큰 단점으로 나타나지만, 국내업체의 시공경험이 비교적 풍부한 장점도 있다. 일본의 경우 해상 연약지반 공사의 경우 Sand Drain 공법을 널리 사용하고 있다.

2.3.3 팩 드레인 공법 (Pack Drain)

연직방향으로 내부식 투수성 포대로 보호된 모래기둥을 설치하여 수평방향 배수거리를 단축시키게 되어 압밀침하 촉진 및 지반강도 증가 효과를 얻을 수 있는 공법으로, 성토고가 7~8m 이내인 구간에 연약지반의 심도가 어느 정도 변화가 없는 구간에 적용가능하며, 모래말뚝공법에 비해 절단 및 넥킹현상을 보완할 수 있으며, 또 상대적으로 모래 사용량이 적고 4분을 동시에 시공할 수 있어 공기를 크게 줄일 수 있다. 타설 후 주머니가 지면에서 50~100cm 정도 올라오기 때문에 설계대로 시공되었는지를 간단하게 확인할 수 있다. 그러나 4분을 동시에 시공해야 하므로 불균일한 지반조건하에서 잔류침하량이 증대되며, 1분의 시공불량시에도 4분을 다시 지중에 관입해야 하므로 불필요한 지반교란이 발생할 수 있다.

2.3.4 모래다짐말뚝 공법 (Sand Compaction Pile)

연약지반에 진동이나 충격하중을 이용하여 모래를 지반속에 압입, 직경이 큰 다짐모래말뚝(직경 500~600mm)을 조성함으로써 모래다짐말뚝의 압입효과를 이용하여 밀도를 증가시키고 배수거리를 짧게하여 압밀을 촉진시키는 공법이다. 본 공법은 일본의 Kansai 국제공항, 홍콩의 Chek Lap Kok 국제공항 등에서 심층 연약지반의 조기강도 증가 및 침하의 촉진등을 위하여 국부적으로 사용된 바 있다.

2.3.5 PDB 공법 (Plastic Drain Board)

모래말뚝 공법과 동일한 원리인 배수촉진 공법으로 모래대신 배수효과가 좋은 토목섬유를 사용하는 공법으로서 심지형태에 따른 배수재의 비교 및 타입공법에 따른 PDB공법의 비교는 아래표와 같다. 본 공법은 Sand Drain 대신에 크기가 작은 토목섬유를 사용하므로 지반의 교란을 최소화 할 수 있어 Sand Drain의 대체공법으로 개발되어 선진외국에서 널리 적용되고 있는 공법이다. 우리나라의 인천국제공항 지역과 유사한 지반특성을 가진 싱가포르의 Changi 국제공항의 연약지반 개량에 사용되고 있으며, 태국의 방콕 제 2 국제공항 등의 지반개량사업에 선정된 공법이다.

표 1. 심지형태에 따른 배수재의 비교

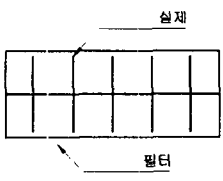
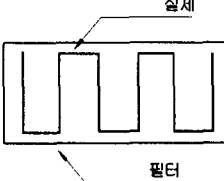
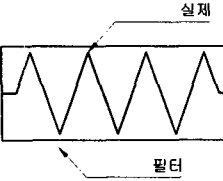
분 류		하모니카 코아형	요철 코아형	필라멘트 코아형
형 태				
배수능력		측압하에서 큰 배수 능력을 가짐	측압하에서 큰 배수 능력을 가짐	측압하에서 배수능력이 감소함
성 능 · 신뢰성	압력하에서 통수단면 변화	단면축소가 작음	단면축소가 다소 큼	단면축소가 매우 큼
	집수면적	전단면에서 집수가능	집수단면이 반으로 감소	전단면에서 집수가능
	지반변형의 적응성(굴곡·절단)	적응성이 좋음	적응성이 좋음	적응성이 다소 나쁨
	필터의 파손 가능성	가능성이 적음	가능성이 적음	가능성이 다소 있음
시 공	타설심도	45m	30m	30m
	타설방법	정적관입	정적관입	정적관입
경 제 성		동 일	동 일	동 일

표 2. 타입공법의 비교

공 법	나 타입공법	Mandrel 타입공법
내 용		
장 점	<ul style="list-style-type: none"> · 장비중량이 비교적 가벼우므로(3.30t) T-raffability가 우수하여 초연약지반에 사용가능 · 시공이 단순하여 시공속도가 빠르고 시공비가 저렴 · 특히 점성토로만 이루어진 초연약 점토지반에서 시공능력이 뛰어남 	<ul style="list-style-type: none"> · 지반중에 모래 및 자갈이 존재할 경우는 Paper Drain 재료 손상이 없이 작용 가능하다. · 깊은 심도의 타입이 가능하다. · 일반적으로 나타입에 비해 Paper Drain 재료의 보호면에서 우수하다.
단 점	<ul style="list-style-type: none"> · 지반중에 조밀한 사질토층이 존재할 경우 타입시 P/D의 손상우려가 있다. · 타입후 인발시 Drain Board가 인발될 우려가 있다. · 타입력이 작아 N> 6인 지반 및 대심도 타입에 곤란 · Mandrel 타입에 비해 대심도일수록 주변 마찰력에 의한 P/D 투수막 손상이 커서 배수기능이 저하된다. 	<ul style="list-style-type: none"> · 장비가 비교적 무거우므로(40~50t) Trafficability의 확보문제가 수반된다. · 시공이 비교적 복잡하여 시공속도가 느리고 시공비가 고가이다. · Casing 사용으로 Smear Effect에 의한 배수기능 저하가 우려
타입심도	· 20m 이내가 효과적	· 30m 이내가 효과적

2.4 연직배수재 타설시 영향

2.4.1 스미어 존 (Smear Zone) 영향

연직배수재 타설시 주변지반의 교란으로 교란영역(smear zone)이 발생하여 주변지반의 압밀계수를 감소시키는 현상인데 대부분 경험적인 예측방법에 의존하고 있다. 실제 설계에서는 수평방향의 압밀계수를 수직방향의 압밀계수와 동일한 값을 적용하여 이를 고려하고 있다(즉, $C_h=C_v$).

이러한 스미어 존의 영향을 고려한 방사선방향의 압밀에 대해서 Scott(1963)에 의해 다음과 같은 해석

방법이 제안되었다. 이를 살펴보면 다음과 같다.

$$U_m = 1 - e^{-8T_r/m} \quad (1)$$

$$m = \left[\frac{n^2}{n^2-1} \ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2} + \frac{k_h}{\gamma_w K} \frac{n^2-1}{n^2} \right] \quad (2)$$

$$\frac{k_h}{\gamma_w K} = \frac{(f-1)k_h}{k_s} \quad (3)$$

2.4.2 웰 레지스턴스 (Well Resistance) 영향

연직배수재의 드레인내의 유수저항으로 인한 수두손실이 발생하는데 이를 감안한 압밀도를 구하여야 하는데, sand drain보다는 단면적이 적은 plastic drain board 및 pack drain에는 문제가 될 수 있다. 따라서 웰 레지스턴스를 고려한 평균압밀도는 다음식을 사용하여 산정할 수 있다.

$$U_m = 1 - e^{-8T_r/(m+0.8L)} \quad (4)$$

$$L = \frac{32}{\pi^2} \times \frac{k_h}{k_w} \times \left(\frac{H}{d_w} \right)^2 \quad (5)$$

상기 식 (4), (5)를 이용하여 sand drain과 plastic board drain의 웰 레지스턴스 영향을 살펴보면 다음과 같다.

표 3. SD공법과 PDB공법의 웰 레지스턴스 영향 예

드레인 종류	PBD (플라스틱 보드 드레인)	SD (샌드 드레인)
드레인 길이 H	20m	20m
드레인 직경 d _u	5cm	40cm
타설간격 d	1.0m(정방향 배치)	1.8m(정방향 배치)
n	22	5
드레인 투수계수 k _c	10 ⁻² cm/s	10 ⁻² cm/s
개랑지반 투수계수 k _n	10 ⁻¹ cm/s	10 ⁻¹ cm/s
Well resistance 계수 L	5	0.08
m	2.35	0.94
이상적인 드레인에 의한 지연	2.7 배	1.07 배

3. 시험시공 개요

3.1 시험시공의 재하 성토높이

시험시공 부지는 장차 영구 활주도로 사용되는 바 재하성토가 충분하지 못하거나, 공법의 효과가 떨어질 경우, 시험성토 후 부족한 부분에 대하여는 추가 성토를 하여야 하는 공정상의 번거로움이 발생한다. 본 구간은 허용잔류 침하량을 7.5cm로 규정하고 있는 바, 상부 연약 점성토의 1차원 압밀 침하량 이외에 creep에 의한 2차 압밀 침하량 및 상대적으로 견고한 하부 해성 점토층에 의한 침하 등을 고려

하였으며, 또한 강성이 큰 SCP 공법구간은 하중전이(load transfer)에 의한 아칭효과로 인하여 하중분담율이 크기 때문에 실제로 지반에 작용하는 성토재하하중은 상대적으로 작으므로 이도 고려하였다.

일반적으로 현장의 실제 압밀속도는 실내 oedometer 시험기에 의한 압밀속도보다 빠른것이 대부분이나 지역적으로 실내시험에 의한 압밀속도보다 느린 경우도 있다. 따라서 안전측으로 재하성토 높이를 7.5m로 계획하였다.

3.2 적용공법 계획 및 계측기 배치 계획

본 시험시공 부지의 수직배수재 설치지역(YARD I ~ IV)에 대한 시험시공 계획도 및 지층현황을 나타내면 그림 3과 같다. 또 계측기 배치의 일반적인 원칙을 고려하여 시험시공 지역의 계측기 배치를 그림 4, 그림 5에 나타내었으며 그 특징은 아래와 같다.

각 소규모 영역별로 대표적인 지반거동을 파악할 수 있도록 가운데에 주 계측기를 설치하고, 각 공법마다 1개씩 침하 프로파일러를 설치하였다. 침하 프로파일계의 연장선에는 경사계를 설치하였고, 각 공법별로 침하 프로파일러에 연하여 1개의 주 계측 단면을 설치하여 성토체의 중앙부와 단부의 거동을 비교, 시험시공의 종방향으로 침하 프로파일러를 설치하여 활주로 종방향의 부등침하 파악이 가능토록 하였으며 마지막으로 성토에 의한 지하수위 상승 높이차를 측정하기 위하여 시험시공 부지주변에 지하수위계를 설치하였다.

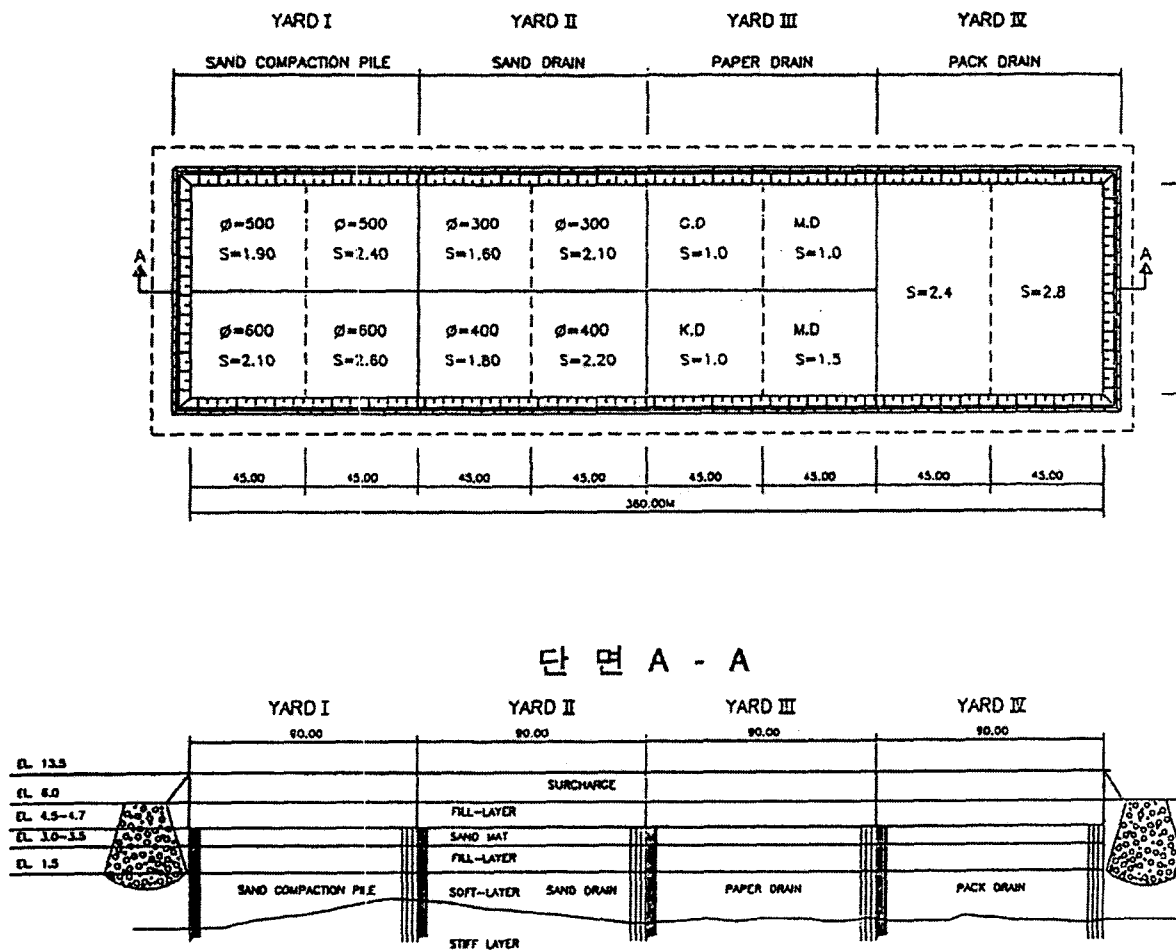
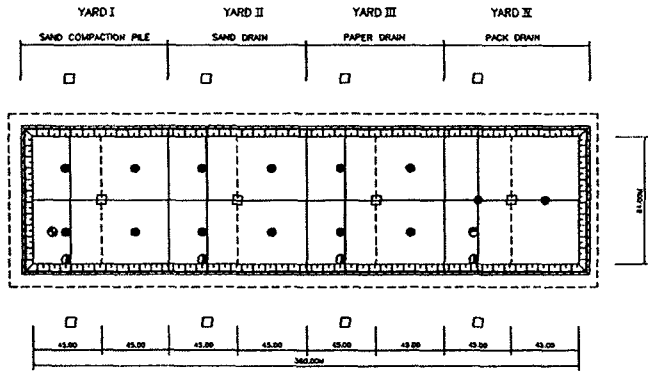
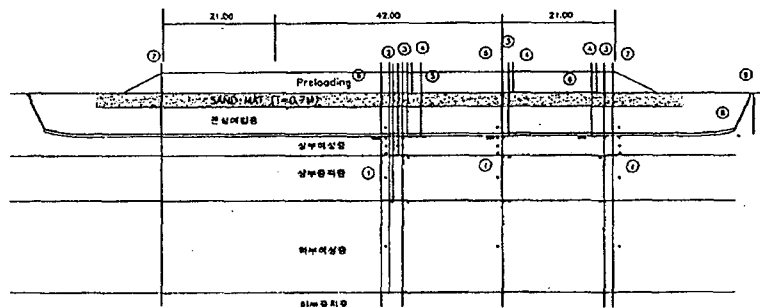


그림 3. 수직배수재 설치 구역의 적용공법 및 구역분할 계획



- : 층별 침하계, 표면 침하봉, Screw Type 침하봉, 침하확인판, 간극 수압계, 토압계, 역채침하계
- : 층별 침하계, 표면 침하봉, 간극 수압계, 토압계, 역채침하계
- : 층별 침하계, 표면 침하봉, 간극 수압계, 토압계, 경사계, 역채침하계
- : 고정점 (침하 기준점)
- : 지하 수위계
- | : 침하 프로파일러
- * 경사계는 사면 방향으로 설치

그림 4. 수직배수재 설치 구역의 계측기 배치 평면도



범 례

- ① 간극수압계
- ② SCREW TYPE 침하봉
- ③ 층별침하계
- ④ 표면침하봉
- ⑤ 침하확인판
- ⑥ 토압계
- ⑦ 경사계
- ⑧ 침하 프로파일러
- ⑨ 지하수위계

그림 5. 계측기 배치 단면도

4. 계측결과 및 분석

4.1 수직배수재 설치여부에 따른 침하량 및 재하기간 검토

1) 수직배수재 비적용 지역 (선행재하 공법)

구 분	연약층 두께 (m)	최종 침하량 (cm)		재 하 기 간 (month) ^a	
		설 계	시험시공 결과적용	설 계	시험시공 결과적용
5-1 공구	6 이하	35	25	26	2.8
5-2 공구	6 이하	39	23	27	2.8
4-2 공구	6 이하	45	23	19	2.8

a 양면배수 조건사용

2) 수직배수재 설치구간

구 분	연약층 두께 (m)	최종 침하량 (cm)		재 하 기 간 (month)	
		설 계	시험시공 결과적용	설 계	시험시공 결과적용
5-1 공구	6 - 10	35 - 54	25 - 39	6	2.4
5-2 공구	6 - 7	39 - 41	23 - 24	6	2.4
4-2 공구	6 - 11.5	45 - 59	23 - 30	6	3.7

3) 침하계측결과 분석

시험시공의 계측결과 수직배수재를 설치하지 않은 단순 성토재하 구간에서 연약층 두께가 평균 9.0m 인 지역임에도 불구하고 2~3개월 동안 90%이상의 압밀이 발생하는 것으로 측정되었다. 이러한 사유는 설계지반의 압밀특성이 당초 실내시험결과보다 상당히 빠르게 진전되며, 특히 Sand Seam이 다수 분포하고 있어 이러한 Sand Seam을 통하여 수평배수가 원활히 이루어져 압밀을 촉진한 것으로 판단된다. 따라서 연약층내의 Sand Seam의 분포파악을 위해 Piezocone조사를 시행한 후, 그 결과를 토대로 유효배수거리를 산정하여 수직배수재 타설유무를 판정하였다.

4.2 공법별 수직배수재의 비교 분석

서로 다른 수직배수재에 대하여 지반조건 등 압밀과정중의 영향인자(웰 레지스턴스, 스미어 존)를 감안한 후에 나타나는 배수효과의 차이는 수직배수재의 실제 성능 차이로 간주할 수 있으며, 대표단면에 대한 계측결과를 기준으로 원지반의 침하 발생형상을 나타내면 그림 6와 같다.

이론적으로 지반의 침하량은 수직배수재의 직경 또는 간격보다는 연약층의 두께에 보다 큰 영향을 받는다. 그러나 침하속도는 수직배수재의 간격 및 성능에 직접적으로 영향을 받는다. 따라서 그림 11에서 나타나듯이 PDB공법이 가장 큰 침하량을 보이고 있으며, 침하속도(즉, 시간-침하곡선의 기울기 또는 곡률)에서도 PDB공법이 다른 공법에 비해 다소 빠름을 볼 수 있다.

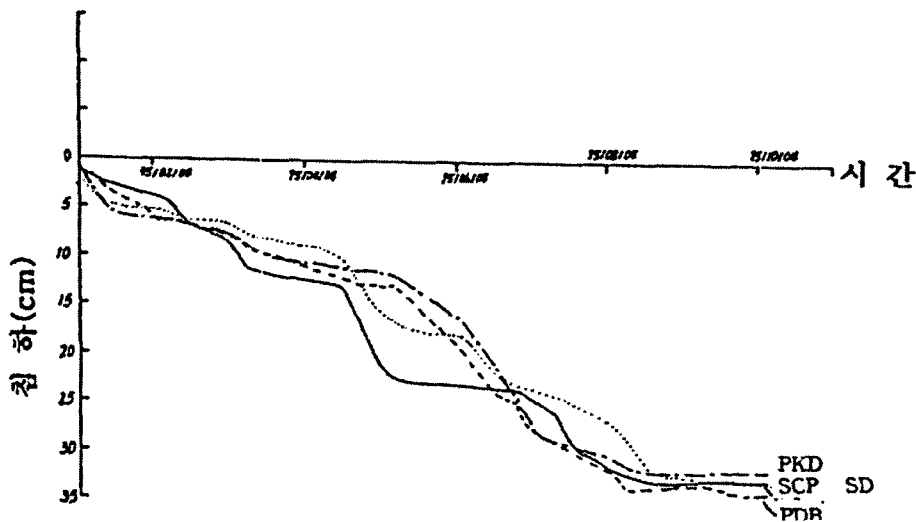


그림 6. 공법별 침하발생 형상

4.3 공법별 경제성 비교

본 시험시공구간에서의 수직배수공법의 경제성을 비교하면 다음과 같다. 본 경제성 비교는 표준품에 의한 것이나 실제 국제적인 공사에 적용되는 비용과는 차이가 있는 것으로 판단되며, 근래에 개선된 PDB 장비는 1일 8시간 기준 4000~5000m 이상의 PDB 시공능력을 갖추고 있어 표준품으로 산정되는 PDB 공법의 1/3~1/2 비용으로 적용이 가능하다. 따라서 향후 국제시장 개방에 대비하기 위해서 현장 조건 및 실제 장비성능 등을 감안한 보다 구체적인 경제성 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

표 4. 수직배수공법의 경제성 비교

구 분	규 격	m당 단가 (원/m)	공당단가(원/공) (10m 기준)	압밀도 90% (등가간격)	단위면적당 공사비 (원/m ²)
S.C.P	φ 500mm	8,850	88,500	2.4m×2.4m	15,364
S.C.P	φ 600mm	9,446	94,460	2.6m×2.6m	13,973
S.D	φ 300mm	4,439	44,390	2.1m×2.1m	10,065
S.D	φ 400mm	4,814	48,140	2.2m×2.2m	9,946
P.D.B	100×3mm	2,682	26,820	1.5m×1.5m	11,920
P.K	φ 120mm	4,824	48,240(×4=192,960)	2.8m×2.8m	24,612

4.4 공법별 시공성 비교

본 시험시공구간에서의 수직배수재 시공성은 시공속도 및 품질관리의 용이성 측면에서 검토될 수 있다. 시공속도측면에서 검토한 결과 PD 공법 및 PDB 공법의 경우가 양호한 것으로 나타났다.

표 5. 수직배수재의 시공속도 비교

공 번	단위면적당 타설깊이 (m/m ²)	시간당 타설깊이 (m/hr)	단위면적당 타설시간 (hr/m ²)
SCP ₁ (φ=500)	6.640	30.00	0.23
SCP ₂ (φ=600)	5.920	30.00	0.20
SD ₁ (φ=300)	9.075	63.75	0.14
SD ₂ (φ=400)	8.260	63.75	0.13
PDB	17.780	179.86	0.10
PK	5.100	123.60	0.04

재료의 품질관리 측면에서 모래를 사용하는 SCP, SD, PD 공법의 경우 입도조건에 맞는 골재원의 확보가 대단히 중요하고 모래의 구입처 또는 골재원이 확보되는 경우 정기적인 품질관리시험을 통하여 품질관리가 용이하다. PDB 공법의 경우 국내 생산품이 다수 있으나 품질관리시험 방법이 명확히 규정되어 있지 않으며, 국제적으로 공인된 시험(하중재하 투수시험등)성과가 다소 미흡한 문제가 있다.

재료의 시공관리 측면에서 SCP 공법은 타설된 모래말뚝의 직경이 심도별로 다양하여 균등한 단면의 모래말뚝 형성이 곤란하고 재료투입량에 대한 관리가 어려우며, 타설시 주변지반의 파괴로 인한 융기가 발생할 우려가 있다. SD 공법의 경우 타설 혹은 casing 인발과정에서 necking 현상 발생우려가 있고, 과도한 침하 발생시 모래기둥의 절단가능성이 있다. PD 공법의 경우 절단가능성이 없고 심도확인이 양호하나 pack의 꼬임 등으로 모래의 투입이 곤란한 경우가 다수 있다. 그러나 PDB 공법의 경우 절단 및 꼬임 등의 우려가 상대적으로 적고 굴곡 투수계수시험등을 통하여 검증되는 경우 과도한 침하지역에도 성능을 유지할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

1. 본 시험시공지역의 해성 점성토 연약지반은 8~10m 정도로 분포하며, 해성 점성토 하부의 상부 층적층은 대부분 SM 층으로 나타나고 압밀이 신속히 진행되고 있다.
2. 시험시공 지역에서 수직배수공법별 압밀촉진효과는 PDB 공법이 침하량 및 침하속도 측면에서 다소 크게 나타나 본 시험시공 지역에서 유리한 수직배수공법으로 나타났다.
3. 수직배수공법별 경제성 비교를 통해 살펴본 결과 SD 공법이 가장 경제적인 것으로 나타났으나, 근래의 PDB 시공능력을 고려한다면 PDB 공법의 1/3~1/2 비용으로 선정이 가능하다. 따라서 향후 국제시장 개방에 대비하기 위해서 현장조건 및 실제 장비성능 등을 감안한 보다 구체적인 경제성 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.
4. 품질관리면에서 시공속도측면에서 검토한 결과 PD 공법 및 PDB 공법의 경우가 양호한 것으로 나타났으며, 시공관리측면에서도 절단 및 꼬임, 과도한 침하지역에서도 성능을 유질할 수 있는 PDB 공법이 양호한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 대한토목학회(1998), “토목기술강좌 - 연약지반 개량공법 및 시공사례” pp. 317~360.
2. 대한토목학회(1998), “토목기술강좌 - 연약지반 처리공법 및 시공관리” pp. 625~691.
3. 대한토목학회(1998), “토목기술강좌 - 인천국제공항 부지조성공사 연약지반 조사 및 대책사례” pp. 997~1050.
4. 신공항건설공단(1995), “수도권 신국제공항 부지조성공사 시험시공 관리용역 종합보고서” .
5. 신공항건설공단(1996), “인천국제공항 A-8공구 연약지반처리 보고서” .
6. 한국도로공사(1999), “99’ 설계 실무교육 교재 - 연약지반 설계편” .
7. 한국지반공학회(1995), “지반공학시리즈 6, 연약지반” .