침하계측 역해석법을 이용한 연직 배수공법의 효율성 검토

김수삼* 안상로** 이재철*** 김형남****

1. 서 론

현재 우리나라의 경우 급속한 경제성장으로 내륙에서의 부지확보가 점차 어렵게 됨에 따라 지반조건이 취약한 해안지대에서 매립을 통한 단지조성이 활발히 이루어지고 있다. 이러한 매립지반은 연약한 점토층으로 구성되어 있어 부지로 활용하기 위해서는 필연적으로 지반안정 처리를 수행하게 된다. 국내에서 수행되는 연약지반 처리공법으로는 주로 선행압밀하중(Pre-Loading)공법을 병용한 Sand Drain 공법, Paper Drain 공법 또는 Pack Drain 공법 등을 주로 적용하고 있는데, 이러한 연직배수공법은 각각 공학적으로 타당한 이론에 근거하며, 설계 또한 이러한 수학적인 이론에 근거하여 수행된다. 그러나 실제로 시공현장에서 관측되는 계측결과들은 설계시 예상한 바와는 큰 차이를 보이는 경우가 많이 있다. 본 연구에서는 대규모 해안 매립이 진행 중인 낙동강 하구언 인근에 위치한 명지 및 녹산지구에서 연약지반 처리공법이 서로 다른 2개의 매립현장을 선택하여 측정된 계측자료를 통해서 연약지반 처리 공법별 처리 효율을 검토하고자 하는 것으로 효율성 검토방법은 다음 2가지 측면에서 비교, 검토하였다. 첫째, 설계시 추정된 침하곡선과 실측 침하곡선을 비교하여 침하량에 의한 각각의 처리공법의 효율성을 검토하였고 둘째, 층별 침하계측치를 이용하여 타입심도에 대한 효율성을 검토하였다.

* 중앙대학교 공과대학 토목공학과 교수
** 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원
*** 한국토지개발공사 토지연구소 과장
**** (주) 아주지오시스템스 지반공학부 차장

2. 압밀침하량 및 압밀 소요시간의 산정 방법

2.1 압밀침하량의 산정 방법

본 연구에서의 압밀침하량 산정방법에는 실내시험결과를 이용한 계산침하량, 쌍곡선법에 의한 최종 침하량 그리고, 계측결과를 현장에서 수행된 full scale 압밀시험으로 간주, 현장조건을 입력치로 사용하여 역해석을 수행, 최종 침하량을 결정하는 3가지 방법을 선택하였다.

계산 침하량은 Terzaghi 1차원 압밀방정식을 수정한 식 (1)의 Schmertmann(1955)의 압밀침하량 산정식을 지배방정식으로 하는 유한 차분법 해석 프로그램인 AH-PLUSE를 사용하여 해석하였으며 무처리 조건하에서 각 토층별로 세분화하는 개념으로 계측결과와의 비교 검토를 위하여 침하측정 소자가 위치한 심도에서 토층분할을 수행하여 침하량을 계산하였다.

$$S = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1)$$

여기서,

S = 압밀침하량　　e_0 = 초기 간극비

C_c = 압축지수　　P_0 = 유효상재하중

H = 압밀층의 두께　ΔP = 성토하중

한편, 현장 계측결과를 이용한 최종 침하량 예측은 쌍곡선법에 의해서 각 침하측정 소자당 최종 침하량을 예측하였으며 쌍곡선법은 "침하의 평균속도는 쌍곡선적으로 감소된다"는 가정하에 초기의 실측침하량으로부터 장기침하량을 예측하는 방법으로 장기침하 예측을 위한 기본식은 다음과 같다.

$$S_t = S_0 + \frac{t}{a+bt} \quad , \quad S_f = S_0 + \frac{1}{b} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2)$$

여기서 , S_t : 성토 종료후 경과시간 t에서의 침하량

S_0 : 성토직후의 침하량

S_f : 최종침하량

t : 성토종료 시점으로부터의 경과 시간

a,b : 실측침하량으로 부터 구한 계수

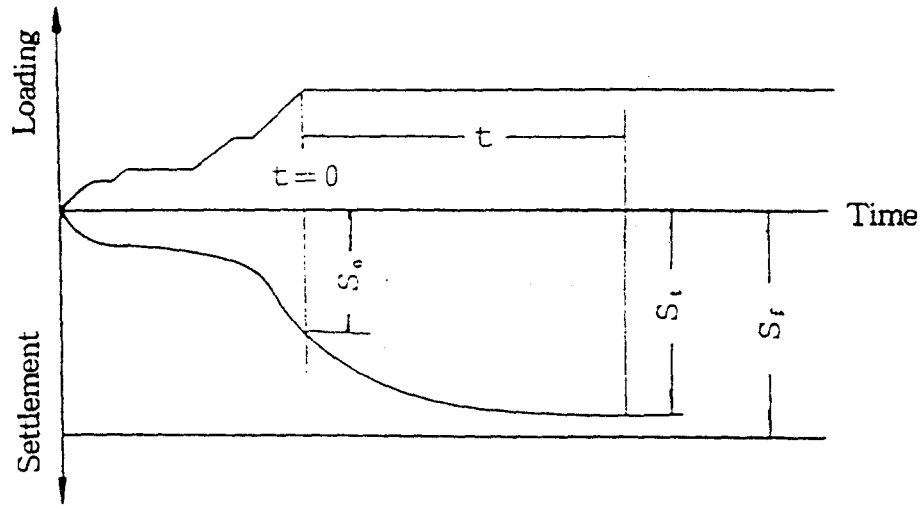

그림 1. 시 간 - 침 하 곡 선

또한 본 연구에서는 역해석법에 의해 최종 침하량을 산정하였는데 지반의 물성치를 변화시켜 현장에서 측정된 계측결과와 일치시키는 일련의 수치작업을 역해석법이라 하며, 역해석의 기본 개념은 설계 및 시공과정 중 여러 가지 불확실 요소와 단순화로 인하여 현장에서 발생되는 제현상을 완벽하게 예측할 수가 없다는 개념에서 출발되는데 이론에 의한 해석결과와 계측치와의 불일치성을 현장에서 측정된 계측치를 해석방

법을 위한 경계조건으로 설정하여 경계조건과 해석방법을 만족하는 지반의 물성치를 수용할 수 있는 범위 내에서 연속적으로 경계조건을 변화시켜 현재까지 측정된 계측치와 일치시켜 나가므로서 최종 침하량을 예측하였다. 본 역해석 프로그램은 쌍곡선법, Hoshino법 그리고 Asaoka법에 의한 최종 침하량을 산정할 수 있고 연직배수공법 적용시 Smear 효과와 Wall Resistance 현상을 고려할 수 있는 한계성토고 추정 및 시공안정 관리가 가능한 AHPLUS S/W를 최종 침하량 추정을 위하여 사용하였다.

본 연구에서는 실측 침하곡선을 모니터에 출력된 상태에서 연약지반 처리공법에 대한 현장 조정 변수 및 단계성토일을 입력하여 각 성토 단계별 최종 발생침하량과 압밀계수 및 지반의 투수계수 등을 변경하는 방법으로 역해석을 수행하였다.

6.2 압밀소요 시간의 산정

투수성이 매우 낮은 포화점성토 지반에서 지반개량을 위해서는 보통 연직배수재를 설치하는데 이경우 해석적인 압밀침하량의 추정방법은 Kjellman (1937), Barron(1948), Hansbo(1981) 등에 의해서 제안되었다. 특히, Barron에 의해서 처음 발표된 연직 배수공법에 의한 압밀 현상문제는 Terzaghi의 일차원 압밀이론을 단순화시킨 것으로 연직배수재 주변에서 발생되는 압밀의 문제를 지표면의 변위가 일정한 경우와 일정하지 않은 경우로 구분하여 현장조건을 이상화시켜 제안하고 있다.

그러나 실제로는 상기 두 조건을 결합시킨 형태로 작용된다고 볼 수 있다. 연직배수재가 점토층에 삽입된 경우의 압밀방정식은 다음과 같다.

$$C_h\left(\frac{1}{\partial r} * \frac{\partial U_r}{\partial r} * \frac{\partial^2 U_r}{\partial r^2}\right) = \frac{\partial U_r}{\partial t} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

여기서 U_r : 임의 시간 t에서 반경방향으로 r 거리에서의 과잉간극수압.

r : 드레인재의 중심에서 반경방향으로의 거리

t : 성토로 인한 최대 과잉 간극수압이 발생한 후 경과시간

C_h : 수평방향의 압밀계수

Free Strain 조건하에서 상기의 압밀방정식인 편 미분방정식을 풀면 다음과 같다.

$$U = \frac{U_0}{r_e^2 F(n)} \left[r_e^2 \ln \frac{r}{r_w} - \frac{r^2 - r_w^2}{2} \right] \exp(\lambda) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

여기서, $\lambda = \frac{-8 T_h}{F(n)}$, $n = \frac{r_e}{r_w}$, $T_h = \frac{C_h t}{d_e^2}$

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} * \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$$

U_0 : 성토 직후 초기 과잉 간극수압

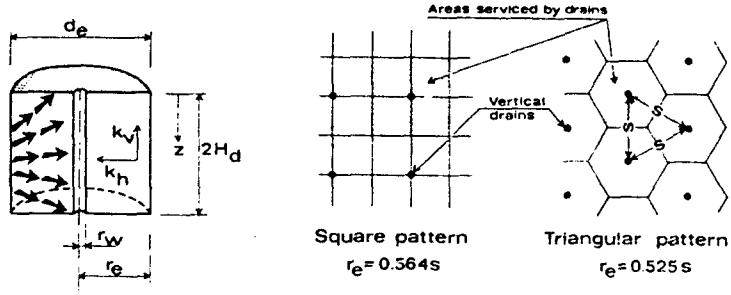

그림 3. 연직배수재의 평면도 및 변수의 정의

따라서 평균압밀도는 다음 식과 같다.

$$\overline{U}_h = 1 - \exp\left[\frac{-8 T_h}{F(n)} \right] \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

Free Strain과 Equal Strain 이론 사이의 차이는 n>5 이고 $T_h > 0.1$ 이면 차이가 발생하지 않으며 상기의 공식은 배수재의 투수성이 반 무한적이며 배수재의 설치에 따른 점토층의 지반교란에 대한 영향을 무시한 경우이다. 그러나 실재로는 드레인재의

설치과정에서 점토층을 교란시키므로서 투수계수 및 강도정수를 변화시킨다. 또한 배수재의 투수성을 반 무한적으로 보는 개념은 극히 이론적으로 볼 수 있으며 특히 조립식 드레인재와 같은 통수단면이 작은 재료에서는 더욱 주의하여야 할 사항이다. 따라서 Hansbo는 드레인재 설치에 따른 Smear 효과와 통수단면의 제한성에 의한 Wall resistance 현상을 고려한 새로운 식을 제안하였는데 이는 평균 압밀도식에서 F(n)을 고려조건에 따라 F(r) 또는 F(s) 등으로 변환하여 적용시킬 것을 제안하고 있다. 여기서, Wall resistance 현상만을 고려할 경우 형상함수는 식 (6)과 같으며 임의시간에서의 심도별 압밀도의 예는 그림 4와 같다.

$$F_r(n) = \ln(n) - 0.75 + 3.14\,Z\,(\,2L - Z\,)K_h/q_w \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

$F_r(n)$: Well resistance 현상만을 고려할 경우의 형상함수
q_w : 배수재의 배수용량
K_w : 배수재의 투수계수
A_n : 배수재의 단면적
L : 배수재의 길이
(Open End일 경우 0.5L, Closed End일경우 L을 사용)

또한, 드레인재를 설치할 때 상당한 지반교란이 드레인재 주변점토지반에서 발생되는 점을 감안하여 Wall resistance 와 Smear 현상을 동시에 고려할 경우에는 식 (7)을 적용한다.

$$F_s(n) = \ln(d_e/d_w) + (K_h/K_r)\ln(d_s/d_w) - 0.75 + 3.14Z(2L - Z)K_H/q_w \quad \cdots\cdots\cdots (7)$$

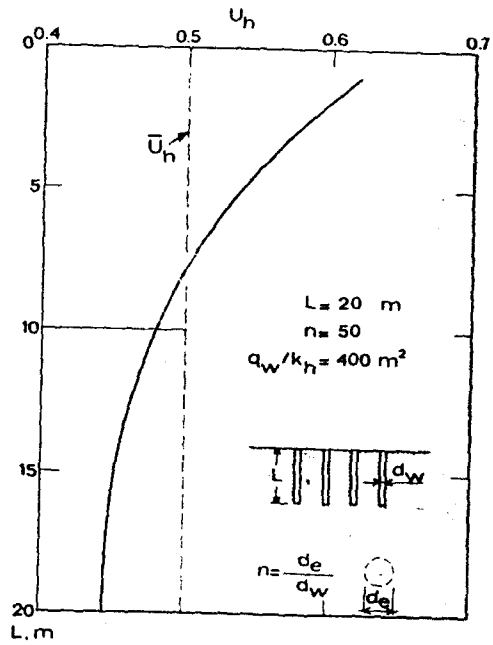

그림 4 Wall resistance현상 고려시 심도별 압밀도 곡선 (예)

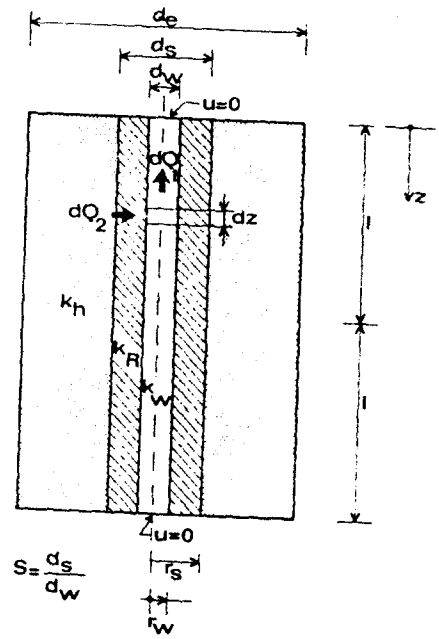

그림 5 Well resistance 및 Smear영향고려시 변수의 정의

3. 연구 대상지역 및 토질 특성

본 연구에서는 연약지반 처리공법 중 각기 다른 Paper Drain + Pre-Loading 공법과 Pack Drain - Pre-Loading 공법의 적용시 나타나는 지반 개량효과를 검토하고 이에 따라 각각의 배수재의 효율성을 검토하기 위하여 두 인접지역인 부산시 강서구 녹산동 공유수면과 명지동 공유수면을 연구대상 지역으로 선정하였으며 현장위치도는 그림 6과 같다.

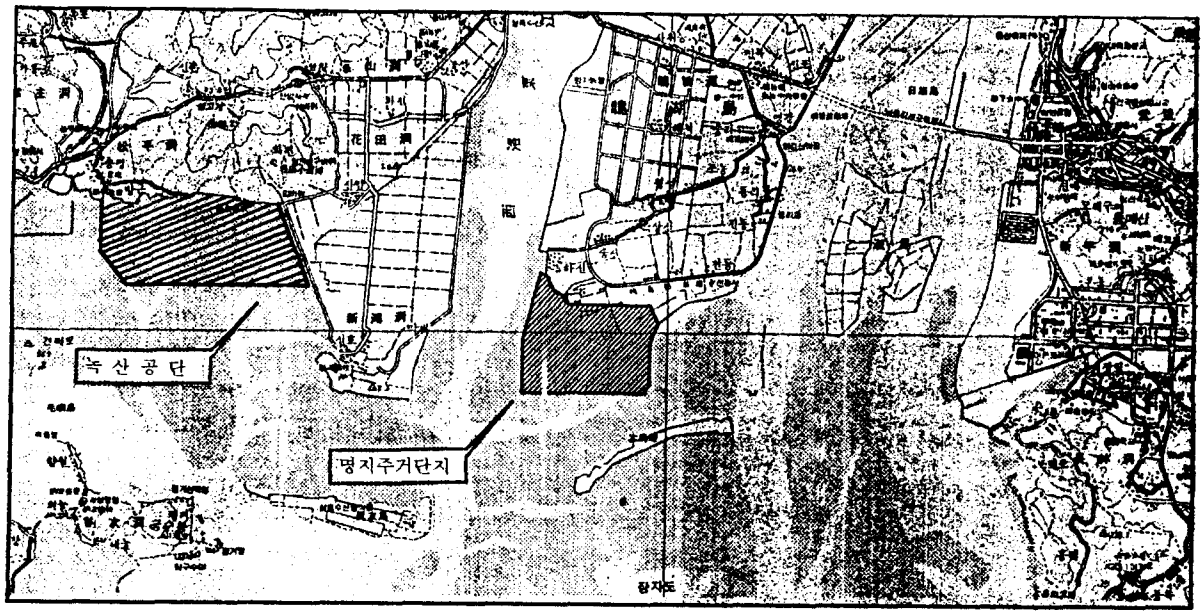

그림 6. 현장 위치도

3.2 토질 특성

연구 대상지역은 부산시 강서구 명지 및 녹산동 공유수면 일대로서 본 지역의 수계는 낙동강의 하구가 본 지역의 중심부에 위치함으로서 이 일대의 상류로 부터 운반되어 온 많은 양의 하상퇴적물이 집적되어 광대한 충적 삼각주 평야를 형성하고 있으며 이 일대의 기반암은 중생대 백악기말 경상계에 속하는 유천층군의 화산분출암인 안산암질 화산 각력암이 분포되어 있다. 설계 당시 수행된 시추조사, 현장 원위치시험, 실내 토질시험결과에 의한 2개 현장의 각 토층별 물리적 역학적 특성은 아래와 같다.

표 2와 그림 7은 녹산공단 설계시 수행된 77공의 시추조사 결과와 명지 주거단지에서 수행된 20공의 시추조사 결과에서 얻어진 각 토의 조성 상태를 보여주고 있다.

표 2 토층의 조성 상태

구 분	토 층		흙 분 류	층 두 께 (M)		
				최 소	최 대	평 균
녹 산 공 단	상부사질토층		SW, SM, SC, SP	1.5	17.0	7.1
	중 간 점토층	N<10	CL, CH, ML	1.4	42.0	24.3
		N>10		0.0	26.0	12.5
	하부하질토층 또는 자갈층		GW, GM, SM, SW, SP	1.6	30.5	10.3
명 지 주 거 단 지	상부사질토층		SM	2.2	13.2	10.8
	중간점토층		CL, CH, ML	15.2	23.1	18.7
	하부 모래 자 갈 층	모래	SM, SP	40.0	43.0	41.4
		자갈	GM, GP			
	하부하질토층		CL	0.8	14.1	-

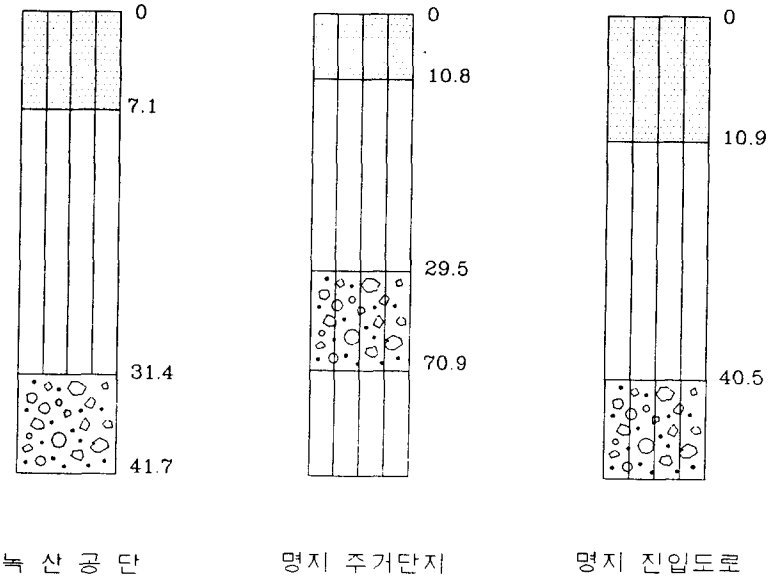

그림 7. 각 지구의 대표적인 토질 주상도

한편, 각 지구의 물리적, 역학적 토질특성은 다음과 같다.

녹산공단인 경우, 상부층은 대부분 실트질 모래(SM)로 200# 통과율이 20-50%로서 비교적 다량의 실트 및 점토분을 함유하고 있으며 표준 관입시험 결과 N치는 대체로 10이내로서 매립성토 재하하중시 상당량의 즉시 침하가 발생 가능한 토층으로 조성되어 있다.

또한, 중간층은 대부분 점토(CL,CH)에 속하며 위치에 따라 일부 지표면 부근에 점토질 실트가 분포하고 있고, N 치는 심도에 따라 0-43으로 변화가 심하나 지표면으로부터 평균 30M 심도를 전후하여 상부층은 N<10이며, 하부층은 N>10인 토층을 이루고 있다.

하부 모래층은 모래 및 모래 섞인 자갈 등으로 구성되며 위치에 따라 다양한 토질특성을 나타내며 N치는 10-50 이상으로 나타났다.

한편, 명지 주거단지의 각 토층별 특성을 기술하면 다음과 같다.

상부토층은 대체로 실트질 세립모래(SM)로 구성되어 있으며 200번체 통과율이 12.7% - 50%,평균 25.3%로 비교적 다량의 실트 및 점토분을 함유하며 본 층의 하층부에는 불규칙하게 얇은 점토층과 조개껍질을 다량 함유하고 있다.

한편, 표준 관입시험 결과 N치는 1-50으로 변화가 심하나 대부분 1-10으로 매우 느슨한 상태로 토층의 평균 두께는 10.8M로서 다량의 즉시 침하발생이 유발되며, 반면 200번체 통과율이 평균 25.3%로 비교적 다량의 실트 및 점토분이 함유되어 있어 이로 인하여 다소 침하 지연현상을 보일 것으로 예상된다.

또한, 중간토층은 상부 사질토층 하부에 분포하며 대체로 높은 소성을 갖는 실트질 점토(CH)로 구성되어 있고 N치는 1-8 정도의 범위에 있으나 대부분 1-4로서 매우 연약한 토층으로 매립 성토하중시 장기 과다 압밀침하가 유발된 것으로 예상된다.

하부모래 및 자갈층은 중간 점토층 하부에 존재하며 상층부는 실트질 세립의 자갈층 모래(SM), 하부는 실트질 모래 자갈(GM)층이 분포하고, 표준 관입시험 결과는 모래층의 N치는 20-50이며 하부 자갈층의 경우 N치는 50 이상으로 매우 조밀한 상태이며 200번체 통과율이 19.2% 정도로 비교적 세립분이 적어 하부 압밀 배수층으로 충분

한 기능을 발휘할 것으로 예상된다.

한편, 445회의 자연시료 채취에 의해 수행한 실내 토질시험 결과를 요약하면 표 4와 같다.

표 4 각 지구의 토질정수

구 분	토 질 정 수		관 계 식 (평균)
	명 지	녹 산	
함수비 (%)	33~55.2 (43.2)	35~70(55)	-0.048z + 55.0 (녹산)
공극비	1.37~1.88(1.5)	1.0~2.0(1.46)	-0.0010z + 1.486(녹산) 0.031z + 1.058 (명지)
액성한계(%)	29~46.8(39.2)	24~80(50)	-
소성지수(%)	5.9~18.4(13.2)	5~58(25)	-
일축압축강도 (kg/㎠)	0.3~1.94(0.8)	0.03~1.12(0.52)	0.018z + 0.221 (녹산) 0.19z + 3.91 (명지)
점 착 력 (kg/㎠)	-	0.15~0.52(0.25)	0.014z + 0.052 (녹산)
압축지수	0.46~1.2(0.77)	0.3~0.75(0.6)	0.014z + 0.489 (녹산) 0.021z + 0.367 (명지)
압밀계수 (㎠/sec)	3e-4~3e-3	6.e-3 ~3.e-4	-

4. 침하량 산정 및 연약지반 처리공법

압밀 침하계산 결과 두 지역에 대하여 각각 무처리인 경우 90% 압밀도 도달시 침하량과 경과시간은 녹산공단인 경우 평균 침하량 1.2 m에 소요기간은 36년이 소요되며 명지 주거단지인 경우 평균 침하량 116 cm에 소요기간은 12.5년이 소요되는 것으로 검토되었으며 본 매립지역을 처리하기 위하여 적용한 공법을 요약하면 표 5와 같다.

표 5 침하량 산정 및 처리공법 현황

현 장 명	침 하 량 산 정	처 리 공 법
녹산공단	- 침하량 계산은 시추공별 실내 시험결과를 이용하여 유한 차분법 해석 프로그램으로 위치별 침하량을 산정. - 구역별 침하대기 가능기간은 공단 조성 소요기간을 최대 3년으로 설정. - 무처리 조건상태의 최대 침하량은 전체 평균침하량은 1.2m이며, 90% 압밀소요기간은 전체 평균 36년 소요.	- 연약지반 처리공법은 Paper Drain 공법 + 선행 압성토 공법을 채택. - 연약지반 처리심도는 평균 20m이며 최대 25m 타입. - 타입에 따른 Smear 효과는 연직 및 수평방향 압밀계수를 동일하게 가정. - Paper Drain 재의 통수단면적의 제한성으로 인한 Wall Resistance 현상은 Barron-Yoshikuni식을 이용. - 연약지반 처리시 90%압밀도 도달시간은 9개월 소요.
명지 주거단지	- 평균성토 두께는 4.5m이며 성토 단위 중량은 1.8 t/㎥ - 압밀침하량의 계산은 Terzaghi의 일차원 압밀이론식을 이용 - 침하시간은 층후 환산법에 의해 계산 - 무처리 조건하의 침하량은 최소 0.73m이며, 최대 151cm로서 평균 116cm 침하발생 예측 - 90% 압밀도 도달기간은 12.5년	- Pack Drain+선행 압성토 공법을 채택. - 타입간격은 1.6m로 정사각형 배치. - 타입심도는 30m로서 4축 타입 장비로 시공. - 설계시 Wall Resistance 현상감안. - 90% 압밀도 도달기간은 9개월. - Smear 효과는 연직 및 수평방향 압밀계수 균등 적용.

5. 현장계측 및 배수기능 효율성 검토 방법

5.1 계측 계획

연약지반의 설계는 실내시험결과를 이용하여 설계되었으며, 설계시의 조건과 실제현장조건의 차이를 극복하기 위하여 현장계측이 수행되었다. 현장계측의 항목은 층별침하계(Magnetic Prob Extensometer), 간극수압계(Pneumatic Piezometer), 경사계(Inclinometer), 그리고 수위계(Water Level Meter) 등을 사용하였으며 녹산공단 및 명

지 주거단지 침하관리를 위해서 4가지의 계측기를 도로성토 중앙단면에 집중 배치하였다.

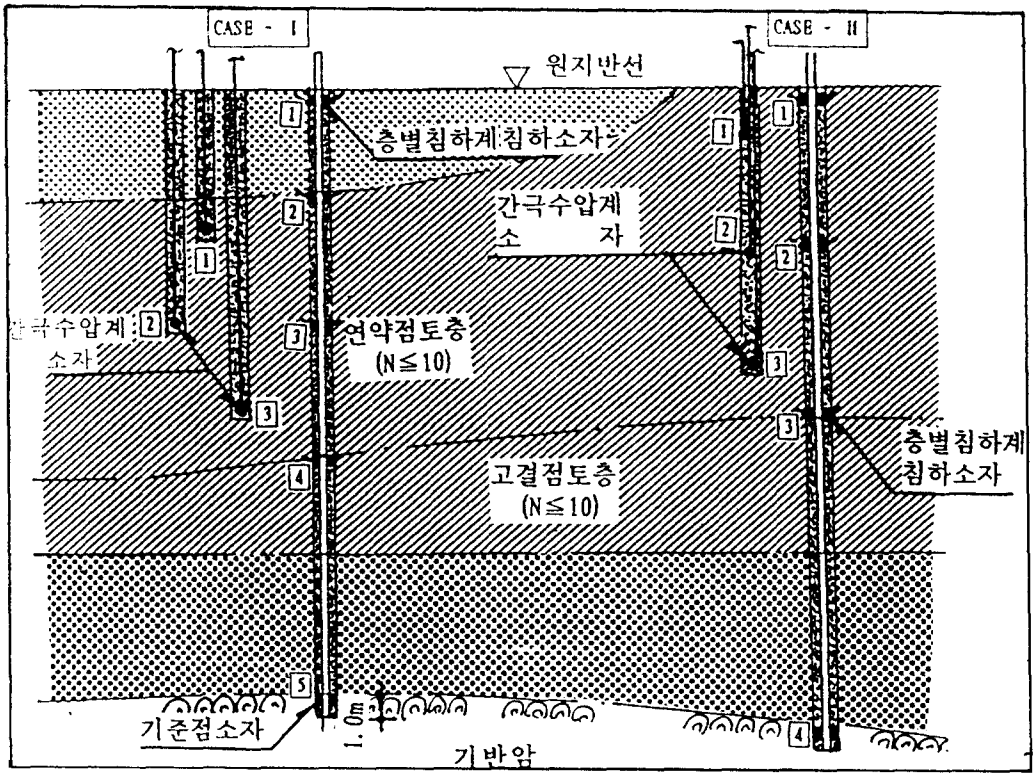

그림 8. 지층을 고려한 심도별 표준 배치도

층별 침하계 및 간극수압계의 설치심도는 계측기 매설 전에 지반조사 결과에 따라 결정되는 것이 일반적으로 이러한 관점에서 당 검토 대상지구의 계측기 매설소자 배치는 표 6과 같이 실시하였다.

표 6 계측기 배치개념

계측기명	설 치 심 도	설 치 이 유
층 별 침하계	1번 소자 원지반 표면	- 전체 침하량의 계측 - 최종 침하량 및 기간 추정 - 설계침하량과 실측침하량과 비교하여 연약지반 처리 효율성 검토 - 토공물량의 산정
	2, 3번 소자 - 상부모래층 하부 - 연약지반처리 심도 중앙부 - 토층이 변화하는 심도	- 상부 모래층에서의 침하량 계측 - 연약지반 처리 효율성 검토 - 토층별 침하량 계측
	4번 소자 - 연약지반 처리층 선단부 - 연약지반 처리 층 중앙하부	- 연약지반 미처리층에서의 침하량을 측정하여 잔류침하량 계측 - 연약지반 처리공법 효율성 검토
간 극 수압계	1번 소자 - 연약지반 처리심도 중상단점토층 - 사질토층에는 배재	- paper drain 공법의 경우 wall resistance 현상에 의한 심도증가에 따른 시간지체 현상 계측 - 간극수압 경시곡선의 파악
	2번 소자 - 연약지반 처리 중간층 - 점토층 중앙부	- 압밀도 산정시 지반을 대표할 수 있는 위치. - 연약지반 처리 효율 검토
	3번 소자 - 점토층 중앙부 및 처리층 하단 - 연약지반 미 처리층	- 연약지반 처리 효율성 검토 - 시간지체 현상 구명 - 미처리 층에서의 압밀도 평가 - 전 심도에 대한 평균 압밀도 산정

4.2 계측결과

녹산 및 명지 현장에서 측정된 계측결과는 각각 그림 9와 그림 10과 같다.

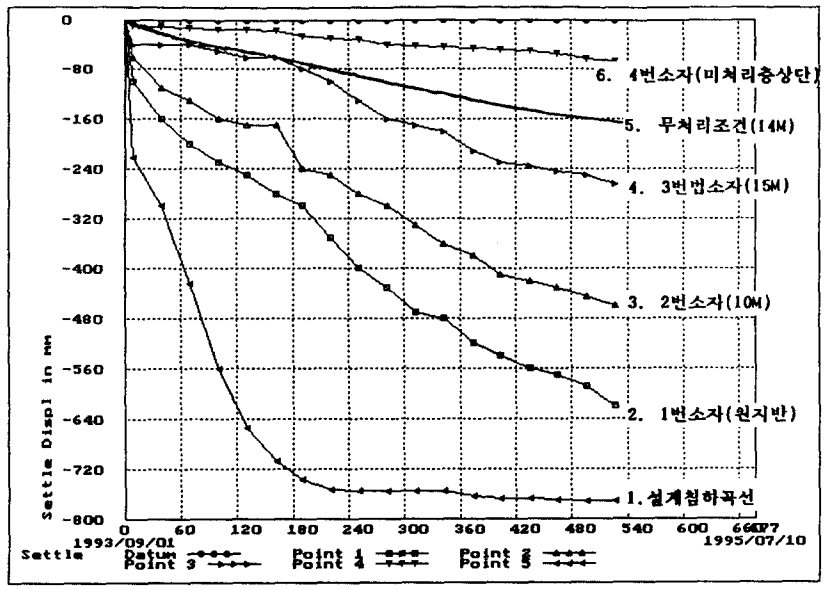

그림 9 녹산공단 계측결과

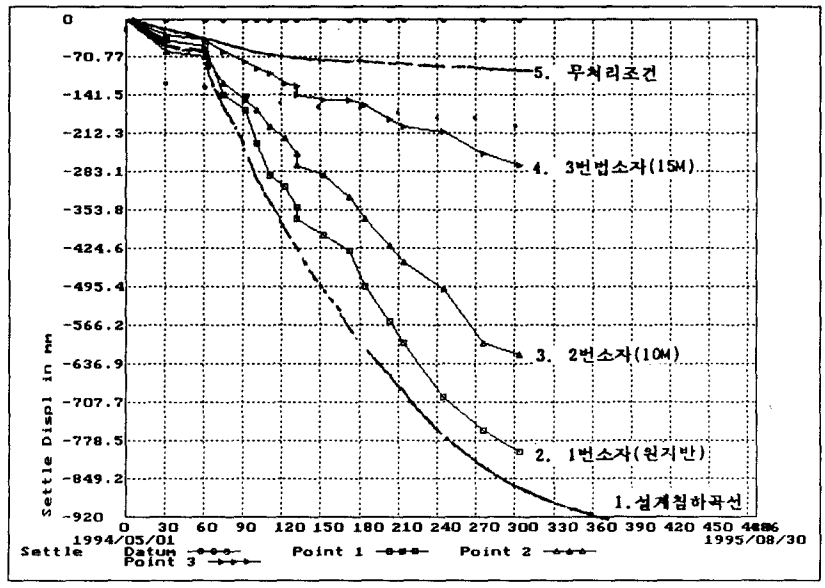

그림 10 명지 주거단지 계측결과

5. 분석 및 고찰

연직배수재의 배수기능 효율성 검토 방법 중 역해석 방법은 아래의 순서에 따라 수행하였다.

1단계는 여러 층에 매설된 측정소자의 침하측정 결과를 이용하여 쌍곡선법에 의해서 각 시도별 최종 침하량을 산정하고, 2단계로 Hansbo 이론을 적용한 연약지반 침하예측 역해석 프로그램(AHPLUS)을 이용하여 Wall Resistance현상을 고려한 조건하에서 현장 C_v 및 최종 침하량 및 발생시기를 예측한다. 한편, 3단계는 1, 2단계에서 예측된 각 심도별 최종 침하량을 적용하여 계측소자가 매설된 토층을 분할토층으로 하여 유한차분법에 의해서 최종 침하량 및 도달시간을 산정한다. 이 때 쌍곡선법에 의해서 추정된 각 심도별 침하량과 비교하고, 4단계에서 1, 2, 3 단계를 통한 다각적인 방법에 의해서 결정된 각 심도별 최종 침하량은 인접 무처리 조건하에서 측정된 계측결과를 이용하여 역 추정된 현장 C_v 값을 추정하여 각 침하소자 매설위치에서의 무처리 조건하에서의 침하곡선을 예측한다. 마지막 5단계는 원지반 표면에 매설된 침하소자의 측정결과를 이용하여 쌍곡선법에 의해서 최종 침하량을 예측하여 이를 설계 압밀도로 곱하여 설계 침하곡선을 추정한다.

위의 5단계에 의해 분석한 2현장에 대한 각 단계별 침하량 분석 결과와 기타 분석 결과는 표 6과 같다.

표 6에서와 같이 녹산공단의 계측결과는 초기 압성일로부터 2.8M 높이로 성토 후 530일 까지 계측한 결과로서 1번 소자에 대해 쌍곡선법으로 최종 침하량을 추정한 결과 현재 압밀도 80%에 도달된 것으로 분석되어 당초 270일 내에 90%의 압밀도에 도달될 것으로 설계되었으나 경과일 270일째는 최종 침하량의 54%만 침하가 이루어진 상태로 나타났다.

표 6 각 단계별 침하량 분석 결과

구분	소자번호	매설위치	최종계측치 (540일)	쌍곡선침하량 (cm)	역해석침하량 (cm)	계산침하량 (cm)
녹산공단	1번 소자	원지반	63.5	79.0	81.0	77.3
	2번 소자	P/D 처리 중앙층 10M	47.0	55.0	-	51.6
	3번 소자	15M	27.0	31.0	-	28.0
	4번 소자	미처리층 선 단 부	7.5	11.0	-	16.0
명지주거단지	1번 소자	지표면	82.0	93.0	90.6	92.0
	2번 소자	점토상단부	63.8	71.0	-	79.6
	3번 소자	PACK DRAIN	28.3	36.0	-	35.8

이와 관련하여, 그림 9에서 보는 바와 같이 현장에서 발생된 실측침하곡선은 압밀 초기단계에서 설계 침하곡선과 비교해 볼 때 상당한 침하 지연현상을 보이고 있다.

한편, 역해석에 의해서 추정된 최종 침하량은 81.0 cm로서 90%압밀도 도달시간은 800일이 소요되는 것으로 추정되었다. 이와 같은 결과는 설계치와 비교해 볼 때 530일이 더 경과된 계산 결과이다. 또한, 역산출된 현장 Cv값은 $2.2e^{-3}$ ㎠/sec로서 설계시 가정된 현장 압밀계수 $4.7e^{-3}$ ㎠/sec 보다 작은 압밀계수가 적용되고 있음을 알 수 있었다. 무처리 조건하에서 측정된 계측결과를 활용하여 역추정된 Cv값을 이용하여 3번 소자 위치에서의 침하곡선은 곡선 5로서 성토 초기단계에서는 무처리 조건하에서의 침하량과 비슷하였으나 누가 경과일수가 180일 이후 50 cm 추가성토 이후에 연약지반 처리에 따른 침하속도가 증가효과를 보았으나 당초 예측보다는 효과가 적게 나타남을 알 수 있었다.

한편, 명지 주거단지의 경우 초기성토일로부터 300일 까지 계측한 결과 쌍곡선법에 의해서 추정된 최종 침하량의 88.5%가 침하한 것으로 나타났으며 그림 10에서 보는

바와 같이 실측 침하곡선과 설계침하 곡선과는 비슷한 경향으로 침하가 발생하였다. 또한, 설계상 90% 압밀도 도달시간은 9개월로서 270일 경과시 실측침하량은 74.0 cm로서 목표침하량 83.7 cm의 88.4%로서 비교적 설계침하와 유사한 경향을 보여주고 있으며 단계성토를 고려한 역추정된 최종 침하량은 90% 압밀도 도달시간이 390일째로서 최종 침하량은 90.6 cm로 추정되었다. 역해석한 결과 각 단계별 현장 Cv값은 $1.7e^{-3}$ ㎠/sec으로서 설계시 사용된 평균 압밀계수 $1.6e^{-3}$ ㎠/sec 보다는 약간 크게 추정되었다. 무처리 조건하에서 측정된 계측결과를 활용하여 역추정된 Cv값을 이용하여 3번 소자 위치에서 추정된 무처리 조건하에서의 시간침하곡선은 그림 10의 5번 곡선으로서 17M의 처리심도에서도 Paper Drain 처리공법보다는 빠른 침하 양상을 보였다.

위의 몇가지 사항을 검토한 결과 Pack Drain 공법은 침하기간 단축면에서 훨씬 유리한 것으로 나타났으며, 타입 심도 증가에 따른 처리효율 감소는 Pack Drain 공법의 경우 17m까지는 뚜렷한 압밀지연 효과가 발견되지 않았으나 Paper Drain 공법의 경우 설계 압밀도 도달기간 내에 측정된 실측침하량은 최종 침하량의 54% 정도 침하가 발생하여 당 현장의 경우 Paper Drain재의 처리 효율은 설계 침하량 대비 50% 내외인 것으로 판단된다. 또한 15m에서 측정된 계측결과에 따르면 무처리 조건하에서의 침하경향으로 보아 Wall Resistance 현상에 따른 시간지체 현상이 발생한 것으로 판단된다. 따라서 Paper Drain 공법 설계시에는 시간지체 효과를 고려하는 것이 타당하다고 보며 타입심도 증가에 따른 압밀지연 효과는 Paper Drain 공법의 경우 원지반 투수계수와 배수재의 투수계수비율에 따라 크게 좌우되므로 설계시 투수계수 추정에 신중을 기해야 하겠다. Paper Drain 공법의 경우 목표 공기 내에 연약지반 처리가 완료되기 위해서는 침하대기 기간과 성토기간을 최소화 하여 드레재의 부식 및 미세립자의 흡착에 따른 배수기능 저하, 침하에 따른 배수재의 절곡현상, 깊은 심도까지 타입을 하였을 때 측방구속응력에 의한 통수단면적의 저하 등의 여러 요인에 따라 배수기능 저하가 발생할 수 있음을 감안할 때 Paper Drain 공법설계 시에는 상기에서 언급한 바와 같은 이제까지 설계에 고려하지 못한 인자들을 실무에 적용, 타입간격의 최소화와 성토기간을 극소화할 수 있는 안정관리 시스템을 갖추도록 해야 할 것이다.

8. 결 론

1. 녹산지구(Paper Drain공법)의 경우 설계시 추정된 침하곡선과는 달리 비교적 큰 침하지연 현상이 발생하였으며, 본 연구 결과 목표 침하량대비 54% 정도의 차이가 나타나는 것으로 이는 설계시 사용된 압밀계수인 $4.7e^{-3}$㎠/sec가 역해석 결과에서 $2.2e^{-3}$㎠/sec로 나타난 점과 무관하지 않음을 확인할 수 있었다.
2. 본 연구분석 결과에 의하면 연약지반 처리층 하단부에서 측정된 침하곡선과 무처리 조건하에서 추정된 침하곡선을 비교한 결과 15m 부근에서의 침하곡선은 명지단지(Pack Drain 공법)의 경우 뚜렷한 시간지체 현상을 확인하지 못하였으나 녹산지구(Paper Drain 공법)의 경우 Wall Resistance 현상에 의한 압밀지연 효과가 크게 발생한 것으로 나타나 Paper Drain 공법 적용시에는 Pack Drain 공법 적용시보다 처리심도에 따른 효율을 충분히 검토하여 설계에 반영하여야 함을 알 수 있었다.
3. 현장 여건을 충분히 고려하고 다양한 계측치를 입체적으로 분석할 수는 없었으나 침하계측 분석의 제한적 검토결과에 의하면 Pack Drain공법이 Paper Drain 공법보다 침하기간을 단축시키는 측면에서 우세한 것으로 나타났으며, 실제로 설계상 불확실 요인 즉, 드레인재의 부식, 절곡 등의 영향을 받는 Paper Drain 공법 설계시 보다 Pack Drain 공법은 상대적으로 이러한 영향을 적게 받는다는 점을 고려해 볼 때 실제 침하경향은 Pack Drain 공법에서 더 유사하게 나타남을 확인할 수 있었다.

7. 참고문헌

1) Arora, J. S(1989). Introduction to optimum design, McGraw-Hill Book Company

2) Barron, R. A. (1948), "Consolidation of fine-grained soils by drain wells", Trans. ASCE, Vol. 113., paper No. 2346.

3) Bergado, D. T., Asakami, H. Alfaro, M. C., and Balasubramaniam, A. S. (1991),

"Smear effects of vertical drains on soft Bangkok clay" J. Soil Mech. Found. Eng., ASCE, 117(10), pp. 1509~1530.

4) Hansbo, S. (1981), "Consolidaion of fined-grained soils by prefablicated drains", paper 12/22 : Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Stockholm, Sweden.

5) Kjellman, W. (1948) "Consolidation of fine-grained soils by drain wells", Trains. ASCE, Vol. 113.

6) Mesri, G. and Rokhsar, A.(1974), "Theory of consolidation of soils", J. Soil Mech. Found. Eng., ASCE, GT8, pp. 889~904.

7) Vanderplaates, G. N. (1987), ADS - A fortran program for automated design system, Ver. 2.01.