KGS Spring Conference 2002 / March 21~22, 2002 / Seoul / Korea

대심도 연약지반에 적용가능한 침하예측기법 개발을 위한 기초적 연구
Preliminary Study on Settlement Prediction of Thick Soft Clay Deposits

정하익[1], Ha-Ik Chung, 진현식[2], Hyun-Sik Jin

[1] 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원, Research Fellow, Dept. of Civil Eng., KICT
[2] 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원, Researcher, Dept. of Civil Eng., KICT

SYNOPSIS : The areas around the Nam-Hae are mostly covered in thick soft clay deposits(50~60.0m). In order to improve the ground in these areas verticals drains have been partially penetrated up to the depth of about 25.0m. However, since the predicted values of settlement have often been changed at some predicted time. Finite element analysis was performed to investigate the consolidation behaviour for it. The results from FEM was compared with various observational methods.

Key word : Soft clay, FEM, Consolidation, Vertical drains, Partial penetration.

1. 서론

우리나라에서는 해안부를 끼고 대단위 공업단지, 주거단지 등이 조성되고 있으며, 특히 남해안 일대에 개발되고 있는 이러한 목적의 사업장에서는 연약지반의 두께가 50~60.0m에 달하고 있다.

이러한 단지내에서의 연약지반 개량공법은 주로 연직배수공법을 적용하고 있으나, 연직배수재에 의한 지반개량은 약 25.0m 정도만 수행되며 그 아래지반은 미처리층으로 존재하고 있다. 이렇게 연직배수공이 부분적으로 관입된 조성단지 내에서 적용된 예측기법에 의한 최종침하량은 예측시점에 따라 다르게 평가되고 있는 등의 문제점을 내포하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 연직배수재가 부분관입된 대심도 연약지반에 대하여 유한요소해석을 통하여 각종 연직배수재 관입깊이별 압밀거동을 관찰하였으며, 이 해석결과를 연직배수재의 관입심도 및 예측시점에 따라 기존의 침하예측기법들에 적용하여 여러가지 예측기법들의 신뢰성을 분석하였다.

2. 지반 및 현장조건

2.1 지반조건

본 해석을 위한 기초지반조건은 경남 OO지역에서 얻어진 실내 토질시험결과를 사용하기로 한다. 본 지역에서는 점성토의 두께는 약 30.0m 이며, 그 아래로는 모래자갈층이 존재하고 있다. 그림 1은 연구대상지역의 지층구조 및 각종 지반특성을 보여주고 있다.

2.2 현장조건

연구대상지역은 경남 남해지역이며, 초기 연약지반 상에 지오텍스타일을 설치한 후 샌드매트(0.5m)를 포설하였다. 그리고, 총 12단계에 이르는 성토과정과 각 성토후 일정방치기간을 두었다. 성토체의 높이는 약 5.0m 이다.

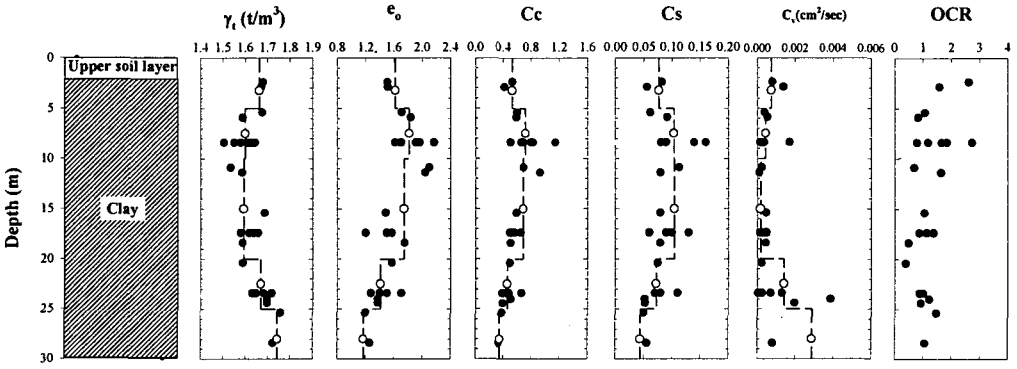


그림 1 연구대상지역의 지층구조 및 지반특성

3. 유한요소해석 및 결과분석

본 해석에서 연직배수재는 PBD를 사용하여 타설깊이비에 따라 드레인을 매설되어있는 것으로 모형화하였으며, 본 해석은 SAGE CRISP 3.02b(SAGE, 1997)을 사용하여 수행하였다.

3.1 유한요소망 및 경계조건

본 해석은 축대칭 단위셀로 모형화된 유한요소해석이다. 유한요소망은 396개의 8절점 등매개요소(장방형)와 444 개의 절점으로 구성되었다(그림 2 참조). 변위경계조건은 좌·우측 연직면에 대해서는 수평변위만을 구속하였고, 바닥저면은 연직방향에 대하여 구속을 하는 조건으로 하였다. 그리고, 배수경계조건은 바닥저면과와 지표면 하부 1.5m지점에서 배수를 허용하였다.

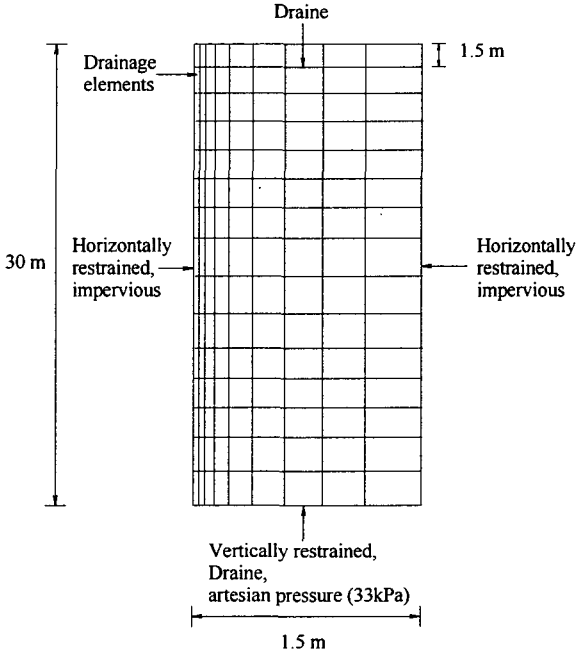


그림 2 단위셀 유한요소망

3.2 초기지반조건 및 재료상수

초기지반조건은 지하수위가 1.5m에 위치하고 있으며, 지표면에서 과압밀비(OCR)를 3.0으로 설정하였다. 그리고 10.0m 깊이에서 1.0이 되도록 직선적으로 변하여, 그 아래의 깊이에서는 정규압밀상태인 것으로 하였다.

본 해석에 적용된 재료상수는 그림 1을 참조하여 매립층 및 점토층에 대하여 각각 표 1 및 표 2와 같이 결정하였다. 또한 매립층 및 점토층에 적용된 해석모델은 각각 탄소성 및 수정 Cam-Clay 모델을 사용하였다.

표 1. 매립층에 적용된 탄소성 매개변수

E_h (kN/m^2)	ν'	γ_t (kN/m^3)	C (t/m^2)	ϕ (°)
25,000	0.3	17.0	0.1	30.0

표 2 점토층에 적용된 수정 Cam-Clay 매개변수

Depth (m)	κ	λ	e_{cs}	M	ν'	γ_{bulk} (kN/m^3)
1.5~5.0	0.0334	0.231	2.214	1.022	0.3	16.621
5.0~10.0	0.0449	0.312	2.811	0.813	0.3	15.992
10.0~20.0	0.0453	0.298	2.886	0.698	0.3	15.928
20.0~25.0	0.0314	0.200	2.240	0.914	0.3	16.691
25.0~30.0	0.0192	0.152	1.849	1.261	0.3	17.429

3.3 해석종류 및 단계

해석종류는 표 3에서 보듯이 연직배수재 타설깊이에 따라 총 10개의 해석을 수행하였으며, 기초지반 조건 및 성토조건은 모두 동일하다. 이들에 대한 해석 단계는 표 4와 같다.

표 3 해석종류

해석 종류	타입심도 (m)	타입비 (타입심도/점토층깊이)	해석 종류	타입심도 (m)	타입비 (타입심도/점토층깊이)
case-1	3.0	0.1	case-6	18	0.6
case-2	6.0	0.2	case-7	21	0.7
case-3	9.0	0.3	case-8	24	0.8
case-4	12.0	0.4	case-9	27	0.9
case-5	15.0	0.5	case-10	30	1.0

표 4 해석단계

해석단계	내 용	기간(일)	해석단계	내 용	기간(일)
0	초기상태	-	431~450	6단 성토	1
1~5	water table	1 (초)	451~500	6단 압밀	4
6~25	Sand Mat	1	501~520	7단 성토	1
26~75	압 밀 0	86	521~570	7단 압밀	3
76~80	연직배수공	1	571~590	8단 성토	1
81~100	1단 성토	1	591~640	8단 압밀	6
101~150	1단 압밀	4	641~660	9단 성토	1
151~170	2단 성토	1	661~710	9단 압밀	9
171~220	2단 압밀	5	711~730	10단 성토	1
221~240	3단 성토	1	731~780	10단 압밀	4
241~290	3단 압밀	5	731~780	10단 압밀	4
291~310	4단 성토	1	781~800	11단 성토	1
311~360	4단 압밀	3	801~850	11단 압밀	5
361~380	5단 성토	1	851~870	12단 성토	1
381~430	5단 압밀	5	871~1070	12단 압밀	10000

3.4 해석결과

그림 3은 드레인 관입비에 따른 시간-압밀도 관계곡선을 나타내고 있다. 드레인 타설깊이가 깊어질수록 빠른 압밀도를 보여주고 있으며, 드레인 관입비가 0.7이상인 경우에는 거의 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그림 4는 최종성토 후 100일 경과된 시점에서의 연약점토층 각 깊이에서의 수평방향별 과잉간극수압을 보여주고 있다. 그림 4에서 좌측은 연직배수공이 타설된 상태이며, 우측은 연직배수재가 타설되지 않은 상태이다. 먼저 연직배수재가 타설된 좌측그림을 보면, 배수재에서의 과잉간극수압은 0으로 나타나며, 우측으로 갈수록 점점 과잉간극수압은 증가하다 일정지점에서부터는 일정하게 나타나고 있다. 점토층 깊이별에 있어서의 과잉간극수압의 크기는 약간 차이는 나타났지만 이것은 원지반의 압밀계수의 차이일뿐이다. 연약점토층 상부와 하부는 압밀계수가 중앙부의 압밀계수보다 크기 때문에 상부와 하부에서의 과잉간극수압은 중앙보다 빠른 소산을 보이고 있다. 그림 4 우측그림은 배수재가 타설되지 않은 상태인데, 수평방향별 과잉간극수압은 일정하게 나타나고 있으며, 배수재가 타설된 경우와 동일하게 상부와 하부에서의 과잉간극수압은 빠르게 소산되고 있으나 중앙에서의 과잉간극수압은 거의 소산되지 않은 상태이다.

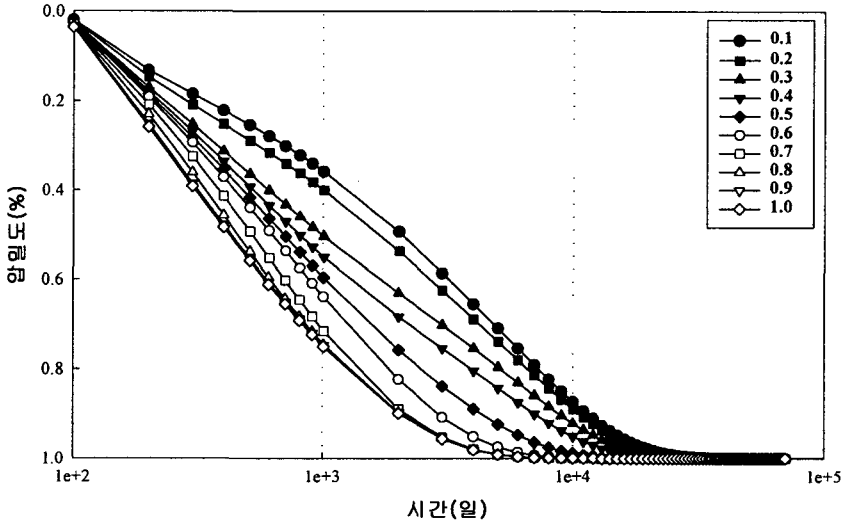
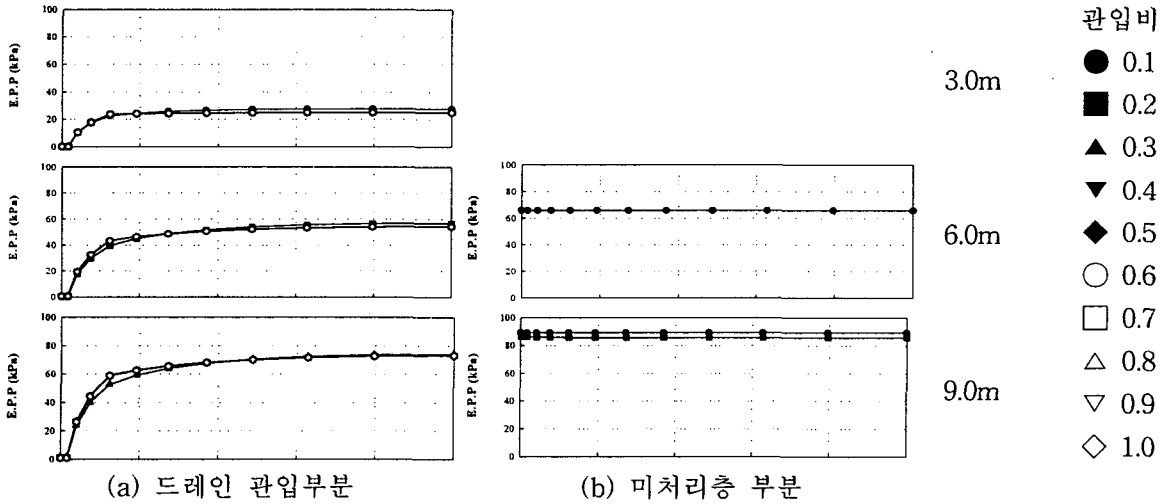
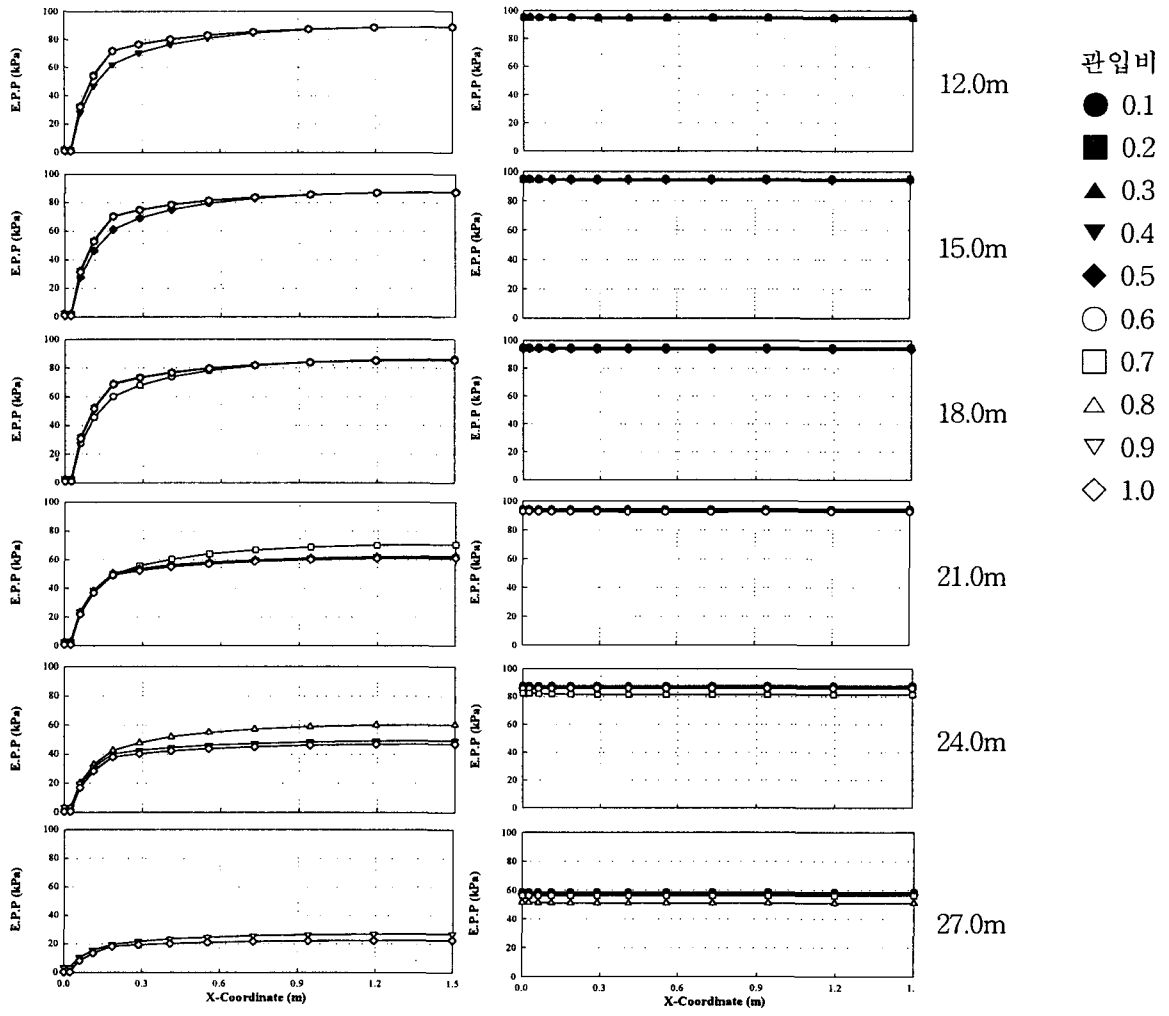


그림 3. 시간-압밀도 관계곡선



(a) 드레인 관입부분 (b) 미처리층 부분

그림 4. 연약점토층 깊이별 과잉간극수압



(a) 드레인 관입부분 (b) 미처리층 부분

그림 4. 연약점토층 깊이별 과잉간극수압 <계속>

5. 각 침하예측기법의 적용

FEM 해석결과를 이용하여 연직배수재 관입비(=연직배수재 타설깊이/연약점토층깊이)에 따른 임의의 압밀시점(U=10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90%)에서의 침하예측기법을 적용하여 최종침하량을 산정한 후 FEM 해석에서의 최종침하량과 비교·분석하였다. 본 연구에서 적용된 침하예측기법은 연약지반에서 많이 적용하고 있는 Hyperbolic, Asaoka, $\sqrt{S}$ 법을 적용하였다. 그림 5~7은 연직배수재 관입비에 따른 임의 압밀시점에서의 침하예측기법을 적용한 후 이를 침하비로 나타내고 있다. 그림 5~7를 보듯이 침하비의 크기는 쌍곡선, $\sqrt{S}$, Asaoka 순으로 나타나고 있으며, 압밀도 20%에서의 최종침하량의 분산도는 아주크게 나타나고 있다.

그림 5는 쌍곡선 방법을 적용하였으며, 압밀도 20~30% 시점에서의 예측침하량의 분산도는 관입비에 따라 아주 크게 나타났다. 따라서 이 시점에서 쌍곡선

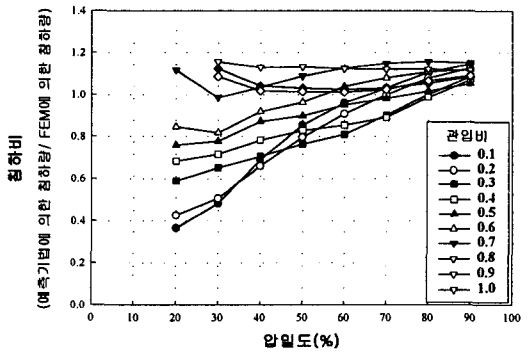


그림 5. 각 예측시점에서의 침하비 (쌍곡선 법)

법을 적용하는 것은 다소 무리가 있을 것이다. 압밀도 50% 이후 침하비의 분산도는 아주 크게 감소하고 하였으나 ±20%의 분산도가 존재하고 있다. 그리고, 압밀도 90%이후 관입비에 관계없이 침하비는 일정 범위내로 수렴하여 이 시점에서의 쌍곡선 방법의 적용성은 높은 것으로 판단된다. 따라서 관입비가 클수록 압밀도에 관계없이 예측방법의 신뢰성은 아주 높게 나타났으며, 특히 관입비가 0.9이상인 경우에는 FEM 해석침하량과 거의 일치하고 있다.

그림 6와 그림 7은 각각 Asaoka 법과 $\sqrt{S}$을 적용하였다. 그림 6을 보면 쌍곡선법과 달리 Asaoka 법의 분산도는 압밀도에 관계없이 거의 일정하게 나타나고 있으나, 압밀초기부분에서 Asaoka 방법을 적용하기에는 다소 무리가 있다.

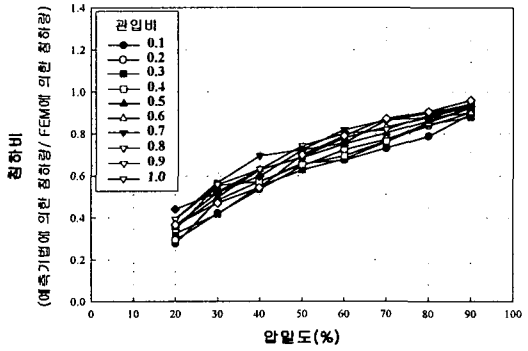


그림 6. 예측시점에서의 침하비(Asaoka 법)

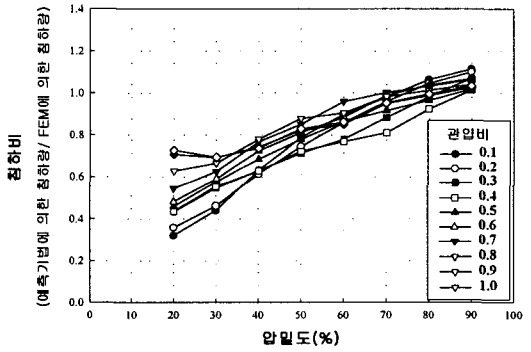


그림 7. 예측시점에서의 침하비($\sqrt{S}$ 법)

6. 결론

연직배수재의 타입깊이에 따라 FEM해석을 수행한 후, FEM 해석결과를 이용하여 침하예측기법을 적용하여 최종침하량을 산정하여 이를 FEM에 의한 최종침하량과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 압밀도 20~30% 시점에서 예측기법에 의한 최종침하량은 FEM 해석에 의한 최종침하량에 비해서 너무 작게 나타났으며, 관입비에 따른 예측침하량의 분산도는 아주 크게 나타나 이 시점에서의 예측기법의 적용은 다소 무리가 있을 것으로 사료된다. 따라서, 압밀도 20~30% 시점에서 신뢰성있는 최종침하량을 예측할 수 있는 침하예측기법의 개발이 시급하다.

(2) 연직배수재의 관입비가 높을수록 압밀시점에 관계없이 예측방법의 신뢰성은 아주 높게 나타났으며, 특히 관입비가 0.9이상인 경우에는 FEM해석 침하량과 거의 동일하게 나타났다.

참고문헌

1. 정성교 등(1998), "압밀해석을 위한 $\sqrt{S}$-예측기법", 한국지반공학회지, 제14권, 제2호, pp.41-52.
2. SAGE(1995), SAGE CRISP : Users guide and technical reference guide, SAGE Engineering Ltd.