

계측결과를 이용한 남약점토의 압축특성 비교

Comparison of Compressibility between the Oedometer Tests with the Field Measurements in Namak Clay

김 동 범¹⁾ · 안 태 봉[†]

Kim, Dongbeum · Ahn, Taebong

ABSTRACT : Compressibility of the marine clay was mainly studied velocity of consolidation and numerical analysis by this time but studies of reevaluated from the field measurement data was a little. For last three years, areal fills and extensive field instrumentations including settlement and pore water pressure were performed in the site of the Youngsan River estuary site, South Korea. From the settlement data, field consolidation curves for sub-layers were reconstructed. Effective surcharge loads during the staged loadings were calculated using the fill heights and the excess pore water pressures in the ground. In the numerical analysis (PLAXIS), prefabricated vertical drains were also simulated. Laboratory, field, and numerical analysis showed good agreements in compressibility. Due to different conditions and limitations of the clay was the same range of the oedometer tests.

Keywords : Back analysis, Field measurement, Consolidation curves, Compressibility

요 지 : 연약지반의 압밀 침하는 침하속도를 예측하거나 수치 해석적 기법에 대한 것에 집중되어 있으며 실내시험으로부터 추정된 압축특성에 대해 계측결과 등을 이용하여 재평가하려는 시도는 매우 적다. 영산강 하구지역에서 분포하는 해성점토에 대하여 실내 표준 압밀시험, 현장에서 약 3년 동안 축적된 층별침하계, 간극수압계, 지하수위계의 계측결과를 바탕으로 한 현장계측 압밀곡선, 그리고 침하해석 프로그램인 PLAXIS를 이용한 연직 배수재가 설치된 지반의 성토이력에 따른 역 해석으로 압축성을 비교 하였다. 여러 제약조건에도 불구하고 현장계측결과에 의해 평가된 현장계측 압밀곡선은 표준압밀시험 결과와 비교적 잘 일치하였다.

주요어 : 역해석, 현장계측, 압밀곡선, 압축성

1. 서 론

우리나라 국토의 70%는 산악지형으로 형성되어 있고 국토면적에 비하여 인구는 많기 때문에 농업용, 산업용, 그리고 택지용 부지가 부족한 상황이다. 따라서 이미 13세기 중반부터 한반도 서해안과 남해안에 광범위하게 분포하고 있는 조간대를 간척하여 사용하여 왔으며(임영춘 등, 1988) 전라남도 영산강하구 부근의 대규모 단지개발사업도 그 중 한 예이다.

사업지구의 대부분은 해성점토의 연약지반으로 구성되어 있기 때문에 연약지반 설계 시 성토 등의 상부하중에 의한 압밀침하를 예측하는 것이 핵심적인 설계 항목 중 하나이다. 연약지반 두께는 약 12m정도 이며 최대 25m 정도의 심도를 보이고 있으며 사업구간 일부에서는 성토하중으로 인한 예상 압밀침하량이 2m(약 10% 변형률) 이상으로 계산되기도 하였다(전라남도, 2003). 따라서 정확한 침하량의 예측은 경제적인 측면 이외에 환경적, 사회적 요인

으로 인하여 현장 인근으로 부터 반입되는 토사량을 최소화 시키는 것 또한 매우 중요한 부분이었다. 또한 지반조사 단계에서 연약지반의 층후를 파악하는 것과 연약지반의 현장상태에서의 압밀특성을 파악하는 것이 가장 중요한 부분 이었다(Won et al., 2006).

연약지반의 압밀 침하량에 대한 대부분의 기존 연구들은 향후 발생될 침하량과 침하속도를 예측하거나 수치 해석적 기법에 대한 것에 집중되어 있다. 지난 수십년 동안 많은 수치 해석적 또는 경험적 침하량 예측 모형들이 제시되어 왔음에도 불구하고(즉, Ladd, 1991; Cao 등, 2001; Ozcoban 등, 2007) 실내시험으로부터 추정되어진 연약지반의 압축특성에 대해 계측결과 등을 이용하여 재평가하려는 시도는 매우 적다(Pelletier 등, 1979; Cao 등, 2001).

지난 3년 동안 연구대상인 남약도시 현장에서는 매립성토와 병행하여 침하계측이 수행되었으며 침하량, 간극수압, 지하수위 등을 포함한 방대한 현장 계측관리가 수행되어져 왔다. 또한, 연약지반의 역학적 특성을 파악하고 연

1) 정회원, (주)삼안 토질부 상무

† 정회원, 우송대학교 철도건설환경공학과 부교수(E-mail : tbahn@wsu.ac.kr)

약지반 두께를 파악하기 위한 방대한 지반조사가 수행되어져 왔다. 설계단계에서 압밀 특성들은 주로 실내시험결과로부터 선정되었다.

본 현장에서 수행되어지고 있는 단지성토는 도로 성토시 발생하는 2차원 또는 3차원 효과를 배제한 반무한 성토형식의 1차원 압밀의 전형적인 예로서 설계단계에서 선정되어진 압밀특성과 현장계측 결과로부터 추정되어진 현장계측 압밀곡선에 의한 압밀특성, 그리고 유한요소 프로그램인 PLAXIS를 이용한 수치해석으로 역해석된 압밀특성을 상호 비교하여 분석하는 것은 의미 있는 일이라 할 수 있다.

본 연구에서는 3가지의 접근방법 즉, 실내 압밀시험 결과, 계측결과를 이용하여 추정한 압밀특성, 수치해석을 통해 역해석된 압밀특성들을 상호 비교하였다.

2. 계측현장 개요

연구지역의 현장은 그림 1과 같이 한반도의 서남해안 전라남도 영산강 하구언 인근에 위치하고 있다. 연구지역의 지형적 특성은 주변 군소 도서들에 의해 둘러싸여 있기 때문에 퇴적물의 침강 작용에 미치는 파랑의 영향은 상대적으로 적고 조위의 영향(조석차는 약 2.7m)이 컸을 것으로 예상된다.

연약지반 등고선도 작성시 약 70 여 개소 이상의 보링공 자료와 100 여 개소 이상의 터치콘 관입시험자료를 이용하여 작성한 연약지반 층 두께 등고선을 남악지역 음영지형도에 중첩시켜 Fig. 1에 나타내었다(전라남도, 2003). 해석지점은 연약지반 두께가 두꺼워 침하가 크게 발생된 S-5지점에 대하여 수행하였다.

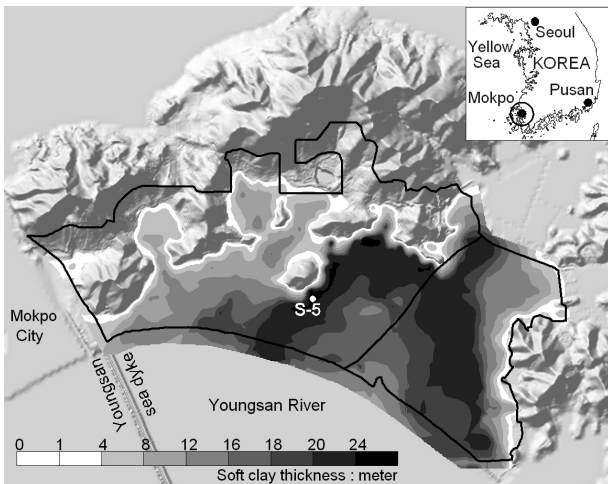


그림 1. 위치도 및 해석지점

해성점토층의 자연함수비 (w_n)는 34~77%, 초기 간극비 (e_0)는 1.19~1.79, 압축지수 (C_c)는 0.48~0.82의 범위에 있다. 전반적으로 액성한계는 자연함수비와 비슷한 범위에 있다(그림 2).

3. 분석방법

3.1 계측결과 분석방법

S-5지점의 계측기는 층별침하계(magnetic extensometer), 간극수압계(vibrating wire piezometer) 그리고 지하수위계이다. 이 계측기들은 2004년부터 운영 관리되어져 왔다. 재하기간 동안에는 주 3회 빈도로 그 외의 기간에는 주당 1회의 빈도로 정기적으로 계측을 수행하였으며 그림 3과 같다. 해석지점은 2007년 6월 현재 침하가 완료되어 계측을 종료하였다. 각각의 계측기 설치심도, 소자명칭 및 압밀시험용 불교란시료 채취위치는 그림 4와 같다. 해석에 사용된 실내압밀시험 결과는 분석지점에 대해 전라남도(2003)에서 KS F 2316-2002에 의거 수행된 압밀시험 결과를 이용하였다.

해석지점의 해석지층은 층별침하계의 설치심도에 따라

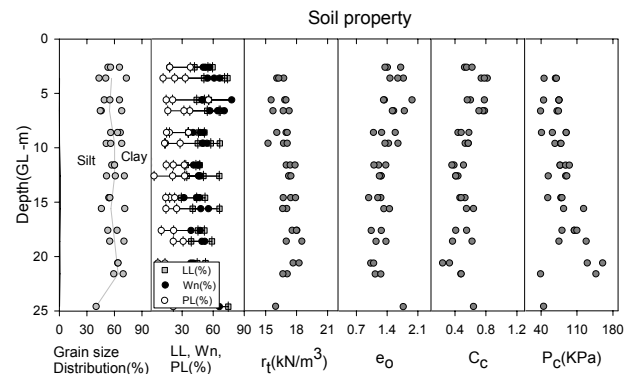


그림 2. 흙의 공학적 특성

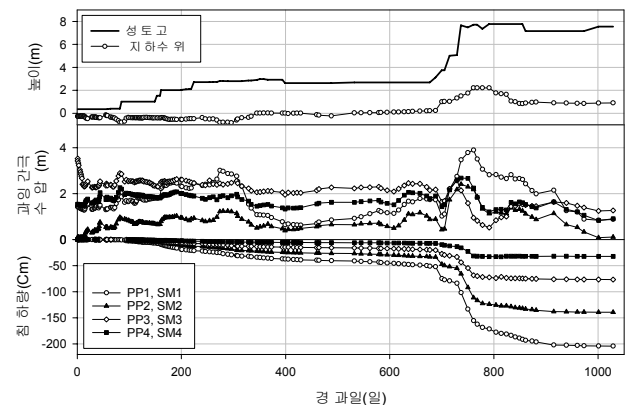


그림 3. S-5지점 계측자료

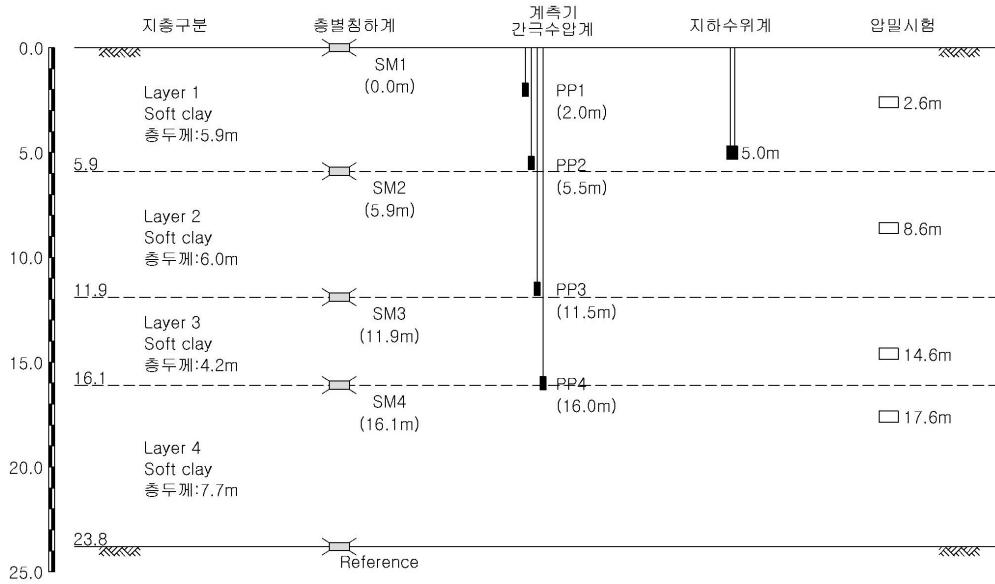


그림 4. S-5지점 지층구분, 계측기, 압밀시험 시료채취 위치

4개의 지층(Layer1, 2, 3, 4)로 구분하였다. 연구지점의 성토형태는 단지개발로서 연약지반 두께에 비하여 성토폭이 충분히 큰 반무한 성토이므로 유효상재하중은 전체 성토하중(=성토고×성토체 단위중량)에서 과잉간극수압을 뺀 값을 유효 연직응력으로 단순화시켜 계산하였다. 성토하중에 의해 지층에서 발생하는 과잉간극수압은 각 단계하중별 성토속도, 방치기간 그리고 연직배수재의 설치간격에 크게 의존한다. 따라서 연약지반의 압밀침하를 발생시키는 유효성토하중은 상부에 가해진 전체 성토하중과 다를 수 있다.

각 Layer별로 발생한 유효상재하중에 해당하는 간극비 변화는 총별침하계의 계측결과로부터 계산 하였다. 초기간극비(e_0)는 각 Layer에 해당되는 표준압밀시험 결과로부터 결정하였다.

수평으로 구축된 일정한 연약층의 침하량에 의한 간극비의 변화는 다음 식 (1a)~(1c)와 같다.

$$\epsilon_v = \frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta e}{1+e_0} \quad (1a)$$

$$\Delta e = \frac{\Delta H \times (1+e_0)}{H} \quad (1b)$$

$$e_1 = e_0 - \Delta e \quad (1c)$$

위 수식에서 ϵ_v 는 변형율, ΔH 및 H 는 침하량 및 연약층 두께, e_1 , e_0 , Δe 는 간극비, 초기 간극비, 간극비 변화이며 침하량은 비체적에 대한 간극비의 변화와 일치하며, 간극비의 변화는 초기의 압밀층과 초기간극비가 동일한 층에서 압밀 침하량의 발생과 일정한 관계가 있다.

현장계측 압밀곡선의 작도는 유효상재하중과 총별 침하

계에서 계측된 압밀침하로부터 유도된 간극비를 이용하여 작성하였다.

3.2 수치해석 방법

본 연구에서는 PLAXIS중 Soft-Soil Model을 이용하여 역 해석을 하였다. 해석단면은 그림 3과 같으며 연약지반 개량을 위한 압밀축진공법은 Vertical drain인 PBD(Plastic Board Drain)공법이 격자형 1.0m × 1.0m로 타설되었다. 초기입력 값들은 기존 연구대상인 남약점토층에 대해 발표(Won and Chang, 2007)된 기존 값들을 주로 사용 하였다. 각 세부 지층에 대한 PLAXIS 입력 지반정수는 단위중량($\gamma=17.0\sim 17.6 \text{ KN/m}^3$), 점착력($c'=1\text{kPa}$), 내부마찰 각($\phi'=30^\circ$), 투수변화지수(permeability change index, $C_k=0.5$) 그리고 정지토압계수 $K_0=0.48$ 을 사용하였으며 표 1에 자세히 나타내었다.

현장에 연직배수재가 설치되는 경우, 배수재의 통수능, 배수재의 변형, 즉 꺾임 또는 접힘, 그리고 스미어(Smear)영역의 영향으로 인하여 점토층에서 발현되는 투수계수를 추정하는 것은 매우 어려운 일이다. Ladd (1991)와 Ozcoban 등(2007) 또한 연직배수재가 설치된 지층에서 압밀속도를 결정 짓는 점토층의 투수계수를 결정하는 것이 매우 어려운 일이라는 것을 지적한 바 있다.

수치 역해석 과정에서 각 점토층의 압축지수(C_c)를 수치 역해석으로 구하였다. 현장에서 이루어진 성토이력을 수치 해석에 반영하였으며 현장에 설치된 연직 배수재(PBD) 또한 PLAXIS 해석 프로그램 내에서 구현하였다. 지층정보와 각 지층의 압밀특성 초기값을 선정한 후 수치해석 결과

표 1. PLAXIS 입력 지반정수

구분	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4
두께(m)	5.9	6.0	4.2	7.7
습윤단위중량(γ , kN/m ³)	17.0	17.0	17.3	17.6
정지토압계수, K_0	0.48	0.48	0.48	0.48
점착력, c (kPa)	1	1	1	1
내부마찰각, ϕ (degree)	30	30	30	30
초기간극비, e_0	1.70	1.36	1.28	1.18
압축지수, C_c	0.85	1.30	0.70	0.45
재압축지수, C_r	0.03	0.05	0.07	0.04
수평방향 투수계수, k_h	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}	3.0×10^{-5}	8.0×10^{-6}
수직방향 투수계수, k_v	5.0×10^{-5}	5.0×10^{-5}	3.0×10^{-5}	8.0×10^{-6}
과압밀비, OCR	3.5	1.85	1.6	1.3

와 현장 계측결과가 일치하도록 압축지수를 시행 착오법으로 변화시켰다.

4. 압밀특성 재평가

분석지점 S-5에 대해 성토이력, 지하수위, 간극수압, 그리고 침하량을 이용하여 현장계측 압밀곡선을 그림 5와 같이 작성 하였다. 각 Layer의 초기간극비(e_0)는 압밀곡선의 비교가 용이하도록 각각의 실내압밀시험 결과와 동일

한 값을 갖도록 하였다.

상부 성토 또는 제하로 인하여 약 20m 이상의 두께를 가지는 연약지반 전체 심도에 걸쳐 과잉간극수압이 동일하게 변화한다거나 또는 시간 지체 없이 즉각 변화한다는 가정하는 것은 다소 무리가 있는 가정일 것이다. 재하시나 제하시에 간극수압의 변화가 즉시 나타나지 않을 경우 유효응력의 오차를 발생시키고 결론적으로 현장계측 압밀곡선의 왜곡을 가져오게 된다. 매설된 계측기 및 타설된 연직배수재(P.B.D) 연직도에 의하여 심도별로 측정된 간극수압 변화가 크게 나타난다. 만약 심도별로 계측기와 연직배

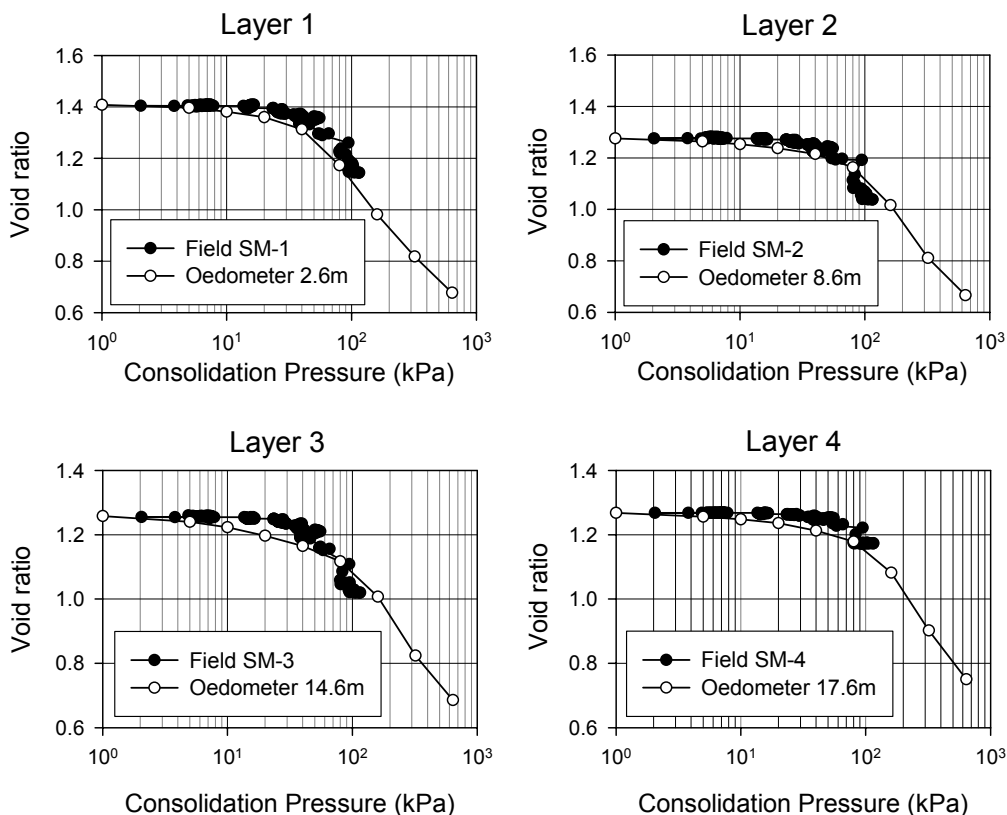


그림 5. 실내압밀시험과 침하계측압밀곡선

수재의 수평간격이 다르다면 하중재하 후 시간에 따른 과잉간극수압의 소산이 틀리기 때문에 이로 인한 유효응력 오차가 발생할 수 있다. 또한, 지하수위의 변화는 성토고가 증가함에 따라 같이 증가하는 것을 알 수 있으며 그로 인하여 지중에서 발생한 과잉간극수압을 과소평가하게 된다. 이러한 현상의 결과로 현장계측 압밀곡선상에서 동일한 간극비의 범위 내에서도 유효응력의 값이 변화하기도 한다. 때문에 실내에서 구한 일차원 압밀곡선과 비교하는 것 자체가 한계를 가질 수도 있다. 따라서 현장계측 결과를 이용하여 구한 압밀곡선을 해석할 때에는 여러 제약조건과 현장조건, 그리고 해석상의 한계를 이해하고 분석하여야 할 것이다.

수치해석 시 초기간극비(e_0)는 분석지점의 실내압밀 시험결과가 아닌 해당지역의 대푯값을 적용하여 분석하였다. 그 이유는 실내압밀 시험 결과는 특정심도의 값을 나타내기 때문에 해석 시 구분된 지층(Layer 1, 2, 3, 4)의 대표성이 부족할 것으로 판단하였다. 해석결과는 실내압밀시험, 침하계측 결과와 PLAXIS해석에 의한 압밀곡선을 그림 6에 나타내었다.

Pelletier 등(1979)은 실내시험, 계측결과 그리고 재구성한 압축성 간에 차이가 발생함을 보고한 바 있다. Cao 등(2001)은 계측결과로부터 역해석한 압축성과 실내시험에서 구한 압축성 사이에 발생하는 차이의 원인으로 시료교

란, 시료크기 영향, 변형률속도의 영향 등을 제시한 바 있다. 이와는 상반되게, 현장 계측의 경계조건과 복잡한 현장조건들로 인해 현장 데이터를 해석하는 것은 매우 어려운 일이다.

본 연구결과 압축지수는 수치해석결과가 가장 크게 평가되었으며 계측결과에서 얻어진 현장계측 압밀곡선은 실내압밀시험곡선보다 약간 크게(Layer 2, 3) 나타나고 있다. 현장계측과 실내시험압밀곡선을 비교할 경우 전체적으로 상당히 일치하는 결과를 보이고 있으며 수치해석의 경우 초기간극비의 대푯값 선정에 따라 영향이 클 것으로 판단된다.

팽창지수는 현장계측결과가 실내시험 보다 매우 작게 나타나고 있으며 수치해석의 경우 실내압밀시험과 유사한데 이는 실내압밀시험 값을 초기 값으로 적용한 결과이다. 실내압밀시험은 시료의 채취, 운반, 성형과정에서의 시료의 팽창 후 재 압축 과정을 거치게 됨으로서 팽창계수가 커지게 된다.

계측 결과와 수치해석결과에서 보면 과압밀비(OCR)와 선형압밀하중(P_c)이 보다 뚜렷이 나타나고 있음을 알 수 있는데 Layer 2 상부의 선형압밀하중이 유효상재하중(P_v)보다 큰 과압밀 상태를 보이며 하부에서는 유효상재하중이 약간 작게 나타나고 있다. 이는 유효성토 하중 계산 시 과잉간극수압 측정의 오차에 기인하는 것으로 판단된다.

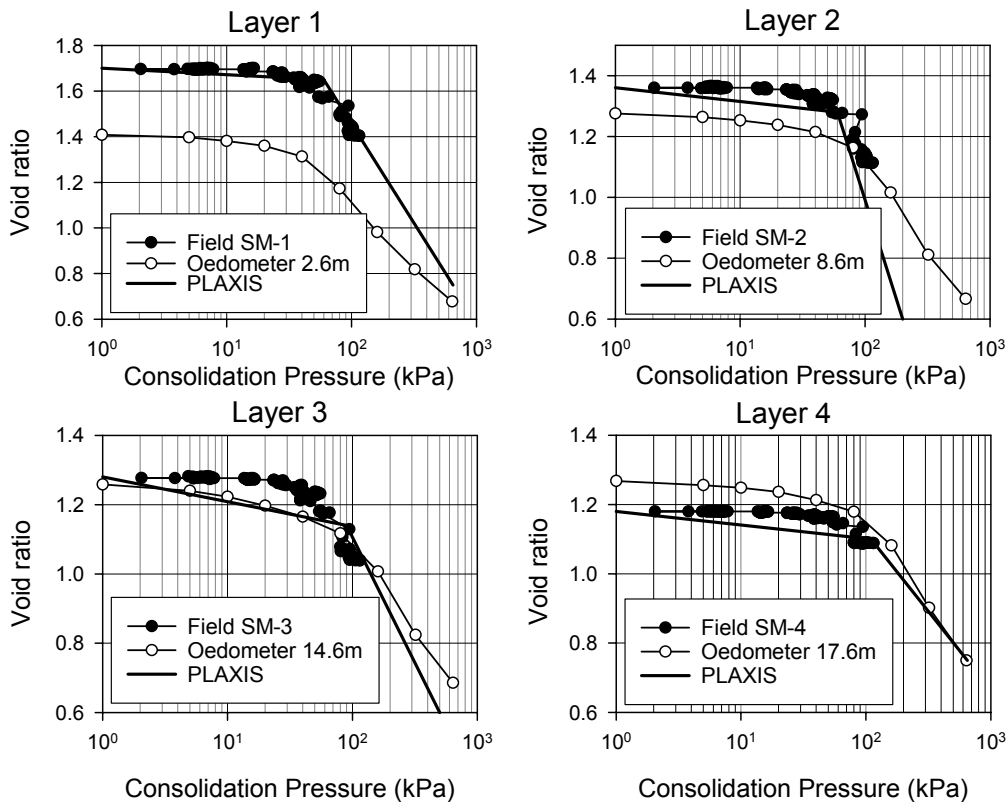


그림 6. 압밀곡선의 비교

5. 결 론

영산강하구 신도시 개발현장에 분포하고 있는 연약한 해성점토의 압축성을 실내시험결과, 계측결과를 이용한 현장계측 압밀곡선, 그리고 수치역해석을 통하여 재평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 압축지수는 수치해석결과가 가장 크게 평가 되었으나 초기간극비의 대푯값 선정에 따라 영향이 클 것으로 판단되며 현장계측과 실내시험압밀곡선을 비교할 경우 전체적으로 상당히 일치하는 결과를 보이고 있다. 따라서 KS F 2316-2002에 의거 수행된 표준 압밀시험은 재하속도, 하중 증가율, 재하기간 등 실제 현장 시공조건과 상이한 시험 조건을 가지고 있으나 연약점토의 압축성평가에 적절하게 사용 할 수 있음을 알 수 있었다.
- (2) 팽창지수는 실내압밀시험의 경우 시료의 채취, 운반, 성형과정에서의 시료의 팽창 후 재 압축 과정을 거치게 됨으로 팽창계수가 커지게 되나 현장계측결과는 시료의 교란과정이 없으므로 가장 작게 나타남을 알 수 있다
- (3) 선행압밀 하중은 압밀침하에 영향이 크며 본 연구 결과 연약 층 전체심도의 반 이상이 과압밀 상태로 존재하는 것이 예측 가능 하며 향후 보다 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- (4) 향후 다양한 장소의 침하계측 자료와 표준 압밀시험과 비교 연구가 수행 될 경우 향후 실제 현장에서의 정확

한 재하성토하중을 평가함으로써 현장의 최종침하거동 예측에 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 전라남도(2003), *남악신도시 개발사업 지반조사보고서*.
2. 임영춘, 신동수, 신문섭(1988), *간척공학*, 경문사, 서울, 2p.
3. Cao, L. F., Chang, M.-F., Teh, C. I. and Na, Y. M.(2001), Back-calculation of consolidation parameters from field measurements at a reclamations site, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 38, No. 4, pp. 755~769.
4. Ladd, C. C.(1991), Stability evaluation during staged construction, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 4, pp. 540~615.
5. Ozcoban, S., Berilgen, M. M., Kilic, H, Edil, T. B. and Ozaydin, I. K.(2007), Staged construction and settlement of a dam founded on soft clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No. 8, pp. 1003~1016.
6. Pelletier, J. H., Olson, R. E. and Rixner, J. J.(1979), Estimation of consolidation properties of clay from field observation, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 2, No. 1, pp. 34~43.
7. Won, J. Y.(2004), *An Experimental Study on Overconsolidation and Mechanical Properties of Reclaimed Area*. PhD Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 174p.
8. Won, J. Y., Chang, P. W. and Son, Y. H.(2006), The chemical bonding and apparent overconsolidation in the Namak marine clay deposit in Korea, *59th Canadian Geotechnical Conference*, Vancouver, BC, Canada, pp. 227~235.
9. Won, J. Y. and Chang, P. W.(2007), *The causes of apparent overconsolidation of the Namak marine deposit, Korea*, *Geotechnique*, Vol. 57, No. 4, pp. 355~369.

(접수일: 2008. 1. 18 심사일: 2008. 2. 29 심사완료일: 2008. 7. 8)