

인천 송도지역 지반의 압밀특성

Consolidation Characteristics of Songdo Area in Incheon

김 동 휘¹ Kim, Dong-Hee

홍 성 진² Hong, Sung-Jin

이 우 진³ Lee, Woo-Jin

고 성 권⁴ Ko, Seong-Kwon

Abstract

In this paper, the consolidation and the permeability characteristics of Songdo were evaluated based on the laboratory and field tests. The test results indicate that silty clay layer above approximately E.L-15 m are consolidation layer, and sand layers embedded in consolidation layers are drainage layers. Consolidation layer was overconsolidated state before the reclamation work; however, it transferred to normalized state after the reclamation work. In addition, the average and the range of consolidation properties and magnitude of anisotropy of coefficient of consolidation were evaluated according to the soil types such as clay, silty, and clayey silt since these properties are sensitive to soil types. These analysis results can be used as preliminary design parameters of consolidation and permeability in Songdo area.

요 지

본 논문에서는 송도지반의 압밀 및 투수특성을 현장 및 실내시험을 이용하여 평가하였다. 송도지반의 압밀층은 약 E.L-15m 상부에 분포하는 실트질 점토층이며, 압밀층 사이에 배수층 역할을 할 것으로 판단되는 모래층이 분포하는 것으로 분석되었다. 압밀층 상부는 매립 전에는 과압밀 상태였으나 매립 후에는 정규압밀 또는 약간 과압밀된 상태로 전이된 것으로 분석되었다. 압밀 및 투수특성은 점토, 실트질 점토, 점토질 실트 등의 흙의 종류에 따라 서로 큰 차이를 보이는 것으로 나타났으며, 본 논문에서는 각 지층에 대한 압밀 및 투수특성 값의 평균 및 범위, 이방성 분석결과를 제시하였다. 본 논문의 압밀 및 투수특성에 관한 연구결과는 송도지역의 초기 지반설계자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Anisotropy, Consolidation, Permeability, Variability

1. 서 론

최근 택지, 항만, 공항, 산업단지 등의 수요가 증대됨에 따라 해안 지반에서의 건설공사가 증가하고 있다. 해안 지반은 대부분 점토로 구성되어 있는 연약지반이며, 이러한 연약지반의 효과적인 이용을 위해서는 압밀

및 강도특성을 정확하게 파악하는 것이 중요하다.

압밀침하량 및 압밀시간을 정확하게 추정하기 위해서는 우선 압밀이 발생 가능한 압밀층 분포와 과잉간극수압이 소산될 수 있는 배수층 분포 파악이 중요하다. 압밀층과 배수층 분포는 연속적인 시험자료를 얻을 수 있어 상세한 지층파악이 가능한 콘관입시험과 시료를

1 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

3 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., woojin@korea.ac.kr, 교신저자)

4 포스코건설 건축사업본부 건축기술그룹 대리 (Assistant Manager, Architecture Technology & Design Group, Architecture Division, Posco E&C)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

직접적으로 확인 가능한 시추조사를 이용하여 파악할 수 있다. 압밀침하량을 예측하기 위해서는 압축지수, C_c 와 재압축지수, C_r 이 필요하며, 표준압밀시험 등을 통하여 구할 수 있다. 압밀속도를 추정하기 위해서는 압밀계수, c_v 를 정확하게 평가해야 하며, 피에조콘 소산시험 등의 현장시험, 표준압밀시험 및 Rowe cell 시험 등의 실내압밀시험을 이용하여 구할 수 있다. 피에조콘 소산시험을 이용한 압밀계수 추정에 대한 연구는 국외에서는 Torstensson(1975), Baligh와 Levadoux(1986), Teh와 Houlsby(1991) 등이, 국내에서는 박용원 등(2003b), 장인성 등(2002), 임형덕 등(2003)에 의하여 심층적으로 연구되었다. 압밀속도에 영향을 미치는 다른 중요한 요소로는 투수계수, k 가 있으며, 압밀계수와 마찬가지로 현장 및 실내시험을 통하여 산정할 수 있다. 자연점토의 투수계수에 대한 연구는 여러 연구자들에 의해서 연구되었으며, 특히 Mesri와 Olson(1971), Mesri와 Rokhsar(1974), Tavenas 등(1983a, b)에 의해서 집중적으로 연구되었다. 압밀계수와 투수계수는 지층의 특성에 따라 수직과 수평방향의 값이 다를 수 있다. 이러한 성질을 압밀 또는 투수특성의 이방성이라고 하며, Baligh와 Levadoux(1980)는 자연점토 특성에 따른 투수계수 이방성의 범위를 제시하였다. 이러한 이방성은 연직배수재 등의 연약지반처리공법을 적용할 때 알아야 하는 매우 중요한 성질이다.

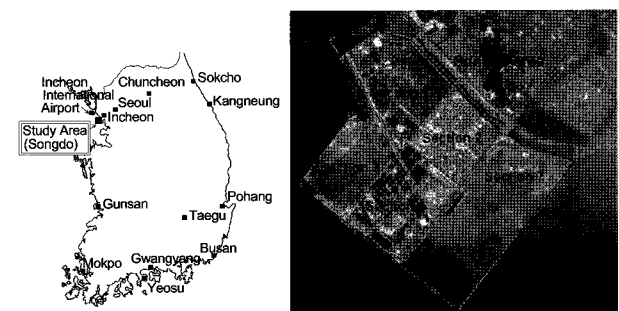
본 논문에서는 이와 같은 압밀 및 투수특성을 송도지역에서 광범위하게 수행된 실내 및 현장시험 결과를 분석하여 평가하였다.

2. 연구대상 지역 위치 및 지반특성

2.1 연구대상 지역 위치

연구대상 지역인 송도신도시는 그림 1에서 볼 수 있듯이 인천광역시 연수구에 위치한 대규모 매립지로 평탄한 지형을 이루고 있으며, 북서쪽으로는 인천국제공

항이, 북쪽으로는 대규모 주택단지인 청라지구가 위치하고 있다. 송도신도시 중 본 논문에서 분석한 지역은 최근 지반조사가 광범위하게 수행된 1, 3공구이다. 지창열(2009)과 최현길(2009)에 따르면 송도신도시 1공구 매립공사는 1996년 11월에 시작하여 2003년 5월에 완료하였으며, 3공구 매립공사는 2001년 1월에 시작하여 2005년 8월에 완료하였다. 본 연구에서 사용한 1공구의 지반조사 자료들은 매립완료시점으로부터 약 1년 11개월(23개월) 후인 2005년 4월 이후에 수행된 것이며, 3공구의 지반조사자료들은 매립완료시점으로부터 약 1년 4개월(16개월) 후인 2006년 12월 이후에 수행된 결과들이다. 또한, 분석에 사용된 지반조사는 매립이 완료된 후 퇴적층과 매립층의 특성을 파악하여 도로, 가시설, 말뚝 설계를 위해 수행된 것으로, 모래다짐말뚝공법, 압밀축진공법, 동다짐공법 등이 적용되기 전에 수행되었다. 일반적으로 해안에서의 매립은 바다에서 이루어지는 작업 특성 때문에 정확한 단계성토높이를 파악할 수 없어 매립이 완료된 시점에 일시 성토를 수행하였다고 가정할 후 조사시점에서의 개략적인 압밀도를 추정해 보았다. 즉, 매립완료 시점부터 조사시점까지의 압밀기간과 매립 전 지반의 평균압밀계수 $6.22 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 를 이용하여 시간계수를 산정하였으며, 이 시간계수를 이용하여 압밀도를 계산하였다. 그 결과 표 1에서 볼 수 있듯이



(a) 연구지역 위치 (b) 공구분할 현황

그림 1. 연구지역 위치 및 공구분할 현황

표 1. 지반조사 시점의 압밀도

공구	압밀층 두께 ¹⁾ , m	배수거리 ²⁾ , m	압밀계수 ³⁾ , cm^2/sec	압밀기간, 개월	압밀도, %
1공구	12	6	6.22×10^{-3}	23	71%
		3(모래층 분포)	6.22×10^{-3}	23	95% 이상
3공구	8	4	6.22×10^{-3}	16	84%
		2(모래층 분포)	6.22×10^{-3}	16	95% 이상

주 1) 압밀시험을 수행한 위치에서의 평균 압밀층 두께임

2) 배수거리는 압밀층 내부에 모래층이 존재할 경우와 존재하지 않을 경우에 대하여 산정한 것임

3) 매립 전 원지반에 대한 시험결과이며, 1, 3공구의 시험결과가 유사하여 공구에 관계없이 동일한 값 사용

매립완료 후 조사를 시작한 16~23개월 후에는 약 71~84% 정도 압밀이 진행된 것으로 나타났으며, 이러한 빠른 압밀속도는 인천 송도 지역의 압밀층이 순수한 점토로 구성된 것이 아니라 실트성분이 많이 포함되어 있는 실트질 점토로 구성되어 있기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 실내시험이 현장의 압밀계수를 과소평가하는 경향과 압밀층 내에 모래층이 분포하고 있는 것을 고려한다면(그림 4~6 참조) 본 논문에서 사용한 지반조사자료들은 대략 80% 이상 압밀이 진행된 지반의 자료일 것으로 추정된다. 따라서 본 논문에서 사용한 시험결과들은 매립 후 송도지반의 압밀특성을 나타내는 지반정수들의 평균, 표준편차 및 분포경향 등에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

2.2 송도지반 특성

함수비와 애터버그 한계, 세립분 함유량 등의 깊이에 따른 분포경향을 분석하기 위하여 표고를 1~2m 간격으로 나눈 후 평균 및 표준편차를 산정하였으며, 그 결과는 그림 2와 같다. 송도지반은 준설 매립한 지역으로 매립층과 원지반 퇴적층으로 구분될 수 있다. 매립층 함수비 평균은 35.6~37.2%로 퇴적층보다 약 5% 정도 큰 것으로 나타났으며, 이는 매립층이 퇴적층에 비해 상재하중이 작고 느슨하여 상대적으로 물을 많이 함유하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 퇴적층의 평균함수비는 심도가 깊어짐에 따라 약간 감소하거나 거의 유사한 것으로 나타났다. 액성한계, 소성한계, 소성지수 등에 대한

자세한 분석결과는 김동휘 등(2009)을 참조할 수 있다.

세립분의 함유량은 압밀침하량 및 압밀시간에 영향을 미치는 요소로 매우 중요한 지반특성이다. #200번체 통과량 즉, 입자크기 $75\mu\text{m}$ 이하의 세립분 함유량의 구간별 평균은 그림 2(d)에서 볼 수 있듯이 표고 E.L-5~-7m까지는 증가하며, 그 하부는 일정한 값을 보이고 있다. $2\mu\text{m}$ 이하 세립분 함유량은 그림 2(e)에서 볼 수 있듯이 심도가 깊어짐에 따라 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 송도지반에서는 심도가 깊어질수록 점토의 함유량이 높아지고 있으며, 이로 인해 액성한계와 소성지수가 심도가 깊어질수록 커지는 것으로 나타났다.

물리적 특성뿐만 아니라 강도특성 또한 연약지반 압밀특성 파악에 중요하게 사용된다. 비압밀비배수시험, 일축압축시험, 현장배인시험 결과를 이용하여 점토 및 실트의 비배수전단강도를 분석하였으며, 그 결과는 그림 3과 같다. 비배수전단강도는 표고 E.L-7m까지는 증가 경향이 뚜렷하나 그 이하로는 거의 일정한 경향을 보이며, 표고 E.L-15m 이하에서는 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 표고 E.L-7m는 퇴적층 상부에 분포하는 실트질 점토층의 중간까지의 깊이이다. 매립층과 퇴적층 상부에 분포하는 실트 및 점토층의 비배수전단강도는 평균 약 11.0~38.7kPa로 매우 연약~중간 정도의 강도를 보이고 있으며, 퇴적층 하부에 분포하는 실트 및 점토층의 비배수전단강도는 평균 약 22.4~62.0kPa로 중간~강한 정도의 강도를 보이고 있다. 시추주상도 분석결과 송도지역에서 표고 약 E.L-15m 이하에는 매우 견고한 점토층이 존재하고 있는 것으로 확인되었다.

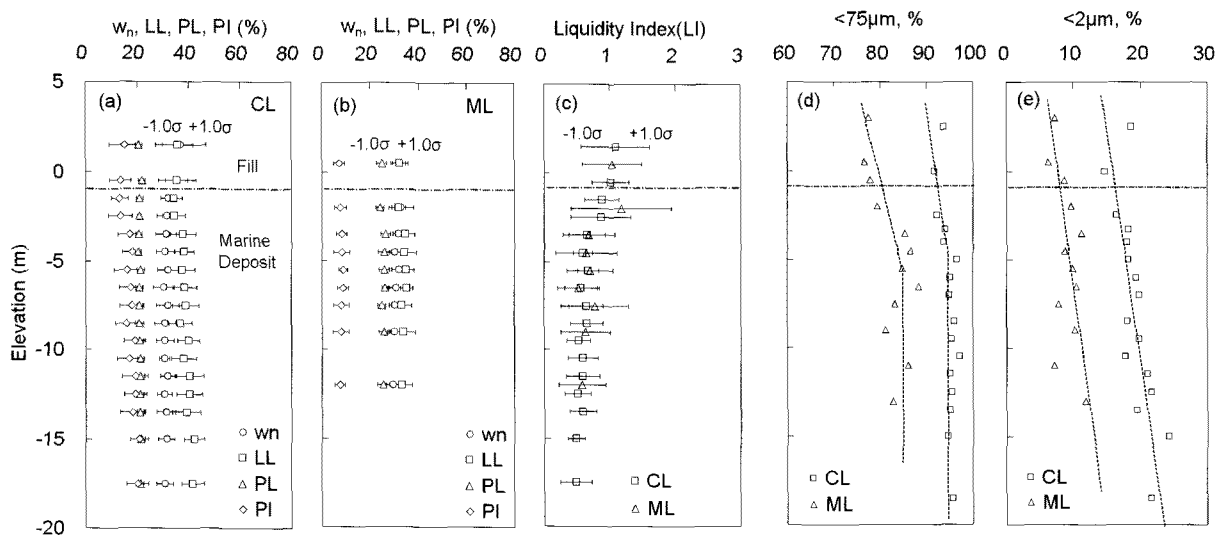


그림 2. 송도지반의 물리적 특성(김동휘 등, 2009)

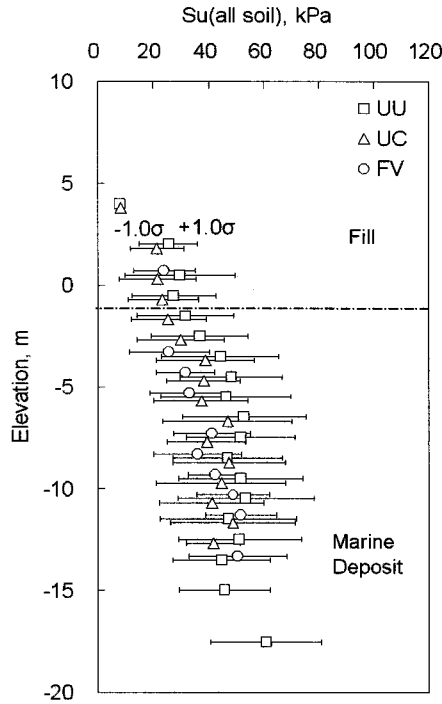


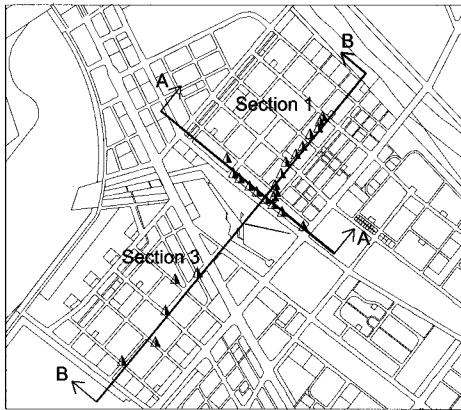
그림 3. 비배수전단강도 분포: UU 비압밀비배수시험, UC 일축압축시험, FV 현장배인시험(김동휘 등, 2009)

3. 시험결과 및 분석

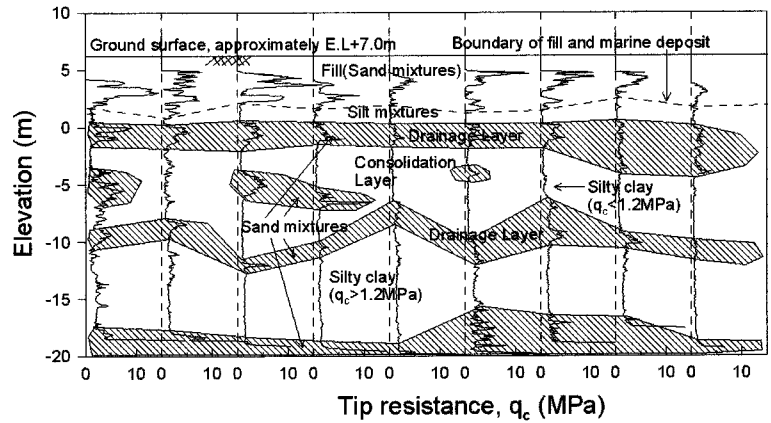
3.1 압밀층과 배수층 분포

압밀층과 배수층 분포 파악은 압밀침하량과 압밀시간을 예측하는데 매우 중요한 요소이다. 본 논문에서는 송도지반의 압밀층과 배수층 분포를 상세하게 분석하기 위하여 연속적인 시험자료를 얻을 수 있는 콘관입시험과 시료를 직접적으로 확인 가능한 시추조사자료를 사용하였다. 본 논문에서 사용한 콘관입시험은 송도지역 부지 및 기반시설 설계를 위하여 수행된 자료이며, 총 25개의 콘관입시험결과를 압밀층 및 배수층 분석에 사용하였다. 그림 4(a)는 분석대상 콘관입시험 수행 위치로 송도지역의 횡방향(A-A 단면)과 종방향(B-B 단면) 지층분포를 파악하기 위하여 선정한 시험들이며, 그림 4(b), (c)는 각각 콘관입시험의 선단저항값을 이용하여 분석한 횡방향 및 종방향의 지층분포이다.

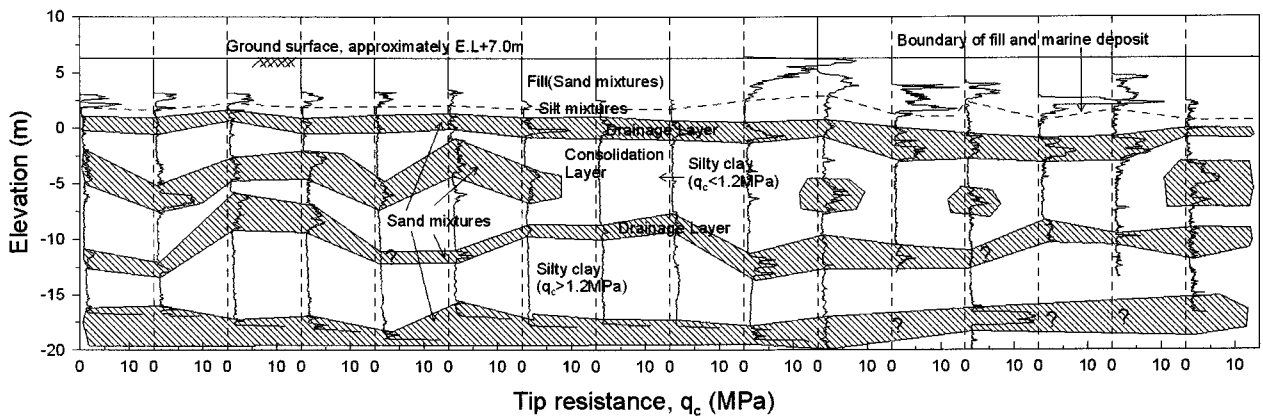
콘관입시험결과를 이용하여 지층 분류를 수행하기 위



(a) 콘관입시험 위치



(b) 횡방향(A-A 단면) 지층분포



(c) 종방향(B-B 단면) 지층분포

그림 4. 콘관입시험 위치 및 지층분포

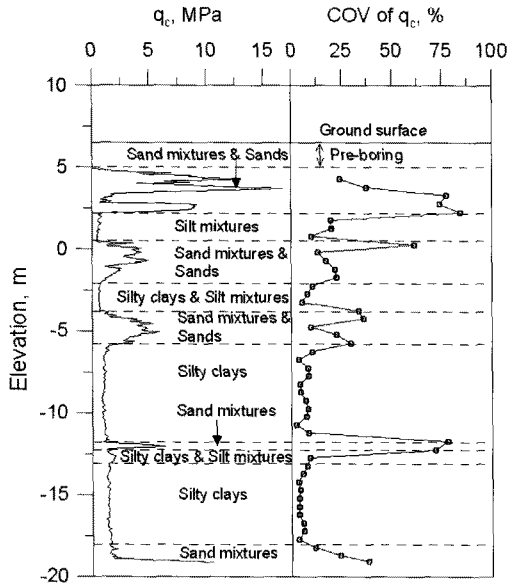


그림 5. 송도지반 대표 CPT profile 및 콘선단저항력의 변동계수

해 Robertson(1990)의 방법을 사용하였으며, 송도지반의 대표적인 콘관입시험결과는 그림 5와 같다. 송도지반은 그림 5에서 볼 수 있듯이 상부는 준설패립층으로 모래 또는 실트와 점토가 섞여 있는 모래혼합층(sand mixtures)이며, 그 하부에는 원지반 해성 퇴적층이 분포하고 있다. 퇴적층은 상부로부터 실트질 점토 및 실트혼합층(silt clays & silt mixtures)과 모래 및 모래혼합층(sand mixtures & sands)이 교대로 분포하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 지층 분포는 그림 4(b), (c)에서 볼 수 있듯이 종방향 및 횡방향 대부분의 시험결과에서 관찰된다. 그림 4(b), (c)에서 약 EL-13m 상부에 분포하는 실트질 점토층은 콘선단저항값이 약 1.2MPa 이하로 측정되었으며, 이 층은 국토해양부(2008)가 콘선단저항을 기준으로 제시한 연약지반 판정기준인 1.2MPa 이하의 범위에 있는 것으로 나타났다. 따라서 약 EL-13m 상부에 분포하는 실트질 점토층이 압밀이 발생 가능한 지반으로 판단되며, 이 층 하부에 분포하는 실트질 점토층은 콘선단저항값이 1.2MPa 이상으로 매우 견고하여 압밀이 발생하지 않는 층으로 판단된다. 압밀층 중간에는 그림 4(b), (c)에서 볼 수 있듯이 국부적으로 모래층이 분포하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 압밀층 상하부에 존재하는 모래층은 국부적으로 분포하는 층이 아니라 송도지역 전체에 연속적으로 분포하며, 압밀시 배수층 역할을 할 것으로 판단된다. 따라서 송도지역에서 압밀시간을 추정할 경우에는 이 모래층을 고려해야 할 것으로 판단된다. 콘관입시험과 시추조사 결과를 종합하여 송도지역의 대

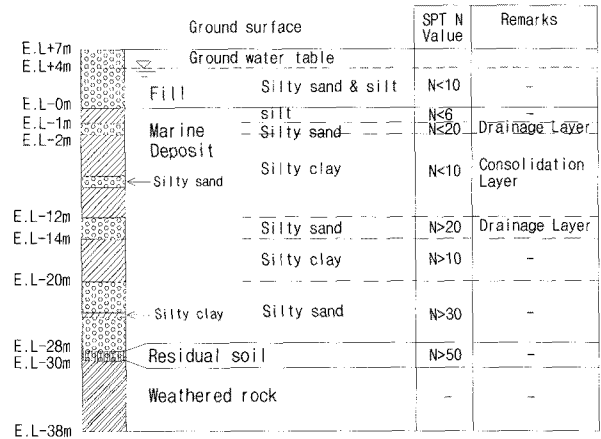


그림 6. 송도지반 대표 지층분포

표 지층분포를 나타내면 그림 6과 같다. 본 논문에서 압밀이 발생할 가능성이 있는 지반으로 분류한 실트질 점토층에는 N값이 10, 콘선단저항이 1.2MPa 이상의 견고한 점토 및 실트층과 모래층이 국부적으로 존재하므로 실제 설계시에는 이러한 층의 분포 여부를 상세하게 조사하여 설계에의 고려여부를 최종적으로 결정해야 할 것으로 판단된다.

본 논문에서는 압밀층 및 배수층을 구성하고 있는 흙의 종류와 지반특성이 각각의 층 내에서 얼마나 균질한지 파악하기 위하여 콘선단저항력의 변동계수(coefficient of variation, COV)를 산정해 보았다. 한 층 내에서 콘선단저항력의 변동계수가 작고 일정하다는 것은 이 지층에 동일한 강도를 보이는 흙이 분포하고 있을 가능성이 높다는 것을 의미한다. 따라서 콘선단저항력의 변동계수는 지층의 균질성을 판단하는 하나의 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다. 변동계수 분석 결과 그림 5 오른쪽 그래프에서 볼 수 있듯이 실트질 점토층은 비교적 콘선단저항력의 변동계수가 작으며, 이는 실트질 점토층에는 대부분 실트질 점토만 분포하기 때문으로 판단된다. 모래층이 분포하는 구간의 변동계수는 실트질 점토층에 비하여 상대적으로 큰 것으로 나타났으며, 이는 모래층이 분포하는 구간에는 모래층만 분포하는 것이 아니라 모래층, 실트질 점토층이 교호하여 분포하기 때문에 실제보다 콘선단저항력의 변동계수를 과대평가하는 것으로 판단된다.

3.2 압축지수, 과압밀비 및 재압축지수

송도지반 과압밀비(OCR) 평균은 그림 7(a)에서 볼 수

있듯이 매립층의 경우 1.1~1.4, 퇴적층의 경우 1.0~1.5의 범위를 보이고 있어 정규압밀 또는 약간 과압밀된 지반으로 평가되었다. 매립 전 원지반의 과압밀비를 추정하기 위해 매립 전 지반조사자료에 대한 압밀시험결과를 분석하였다. 분석결과 그림 8에서 볼 수 있듯이 매립 전 원지반의 과압밀비는 깊이 2m 이하에서는 3.4~9.4(평균 6.1), 2~4m에서는 0.9~4.3(평균 2.6), 4m 이상에서는 0.7~3.8(평균 2.0)의 값을 보이며, 깊이가 증가함에 따라 과압밀비는 감소하는 경향을 보이고 있다. 매립 전 원지반이 과압밀된 상태이므로 매립에 의한 압밀침하량을 추정하기 위해서는 과압밀지반에서의 침하량 산정식을 사용해야 할 것으로 판단되며, 매립 전의 지반을 정규압밀 지반으로 가정할 경우 침하량을 크게 평가할 가능성이 있을 것으로 판단된다. 그림 7(b)와 같이 압축지수를 CL과 ML로 구분하여 분석한 결과 CL이 ML 보다 압축지수가 크며, CL의 경우 매립층은 평균 0.35(표준편차 0.16), 퇴적층은 평균 0.32(표준편차 0.10), ML의 경우 매립층은 평균 0.20(표준편차 0.09), 퇴적층은 평균 0.24(표준편차 0.12)의 압축지수를 보이는 것으로 분석되었다.

그림 7에서 볼 수 있듯이 압축지수는 심도에 따라서 약간의 변화를 보이고 있으나 일반적인 시험결과에서 크게 벗어나는 매립층의 시험결과를 제외하면 심도에 따라 거의 일정한 경향을 보여 압축지수에 대한 확률분포를 산정해 보았다. 만약, 압축지수가 심도에 따라서

증가 또는 감소하는 뚜렷한 경향성을 보일 경우에는 그 경향성을 분석하여 특정 심도에서의 압축지수를 추정해야 한다. 본 논문에서는 확률분포형으로 정규분포, 대수정규분포(2변수, 3변수)를 사용하였으며, 매개변수 추정방법으로는 모멘트법을 사용하였다. 압축지수의 확률분포형을 추정하기 위하여 적용한 2가지 확률분포형에 대한 적합성을 Kolmogorov-Smirnov(K-S) 검정방법을 이용하여 판정하였다. 확률분포형의 적합성 판정결과 ML만의 자료(그림 9(a))와 CL과 ML의 자료를 모두 사용하였을 경우(그림 9(c))에는 유의수준 0.05에서 모든 확률분포형이 적합한 것으로 평가되었으며, CL만의 자료를 사용한 경우(그림 9(b))에는 대수정규분포는 유의수준 0.05에서, 정규분포는 유의수준 0.01에서 적합한 것으로 나타났다. 이는 그림 9(b)에서 볼 수 있듯이 CL이 약간 왼쪽으로 치우친 분포를 보이고 있어 대칭적인 특성을 보이는 정규분포는 유의수준 0.05에서 기각된 것으로 판단된다. 그림 9에서 Normal은 정규분포, Log-normal3은 3변수 대수정규분포, Original data는 시험자료의 분포를 의미한다.

재압축지수는 CL, ML이 각각 평균 0.046, 0.030의 값을 보이고 있으며, CL의 재압축지수가 ML 보다 큰 것으로 나타났다. 이는 CL이 ML에 비하여 상대적으로 소성이 크기 때문인 것으로 판단된다. 그림 10에서 볼 수 있듯이 재압축지수는 ML, CL의 종류와 무관하게 압축지수의 1/5~1/10 사이에 분포하고 있는 것으로 나타났

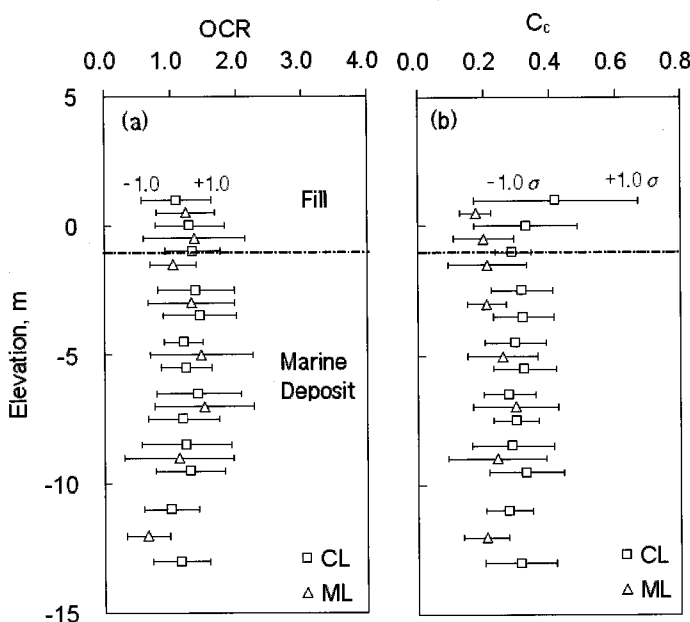


그림 7. 깊이에 따른 과압밀비와 압축지수(김동휘 등, 2009)

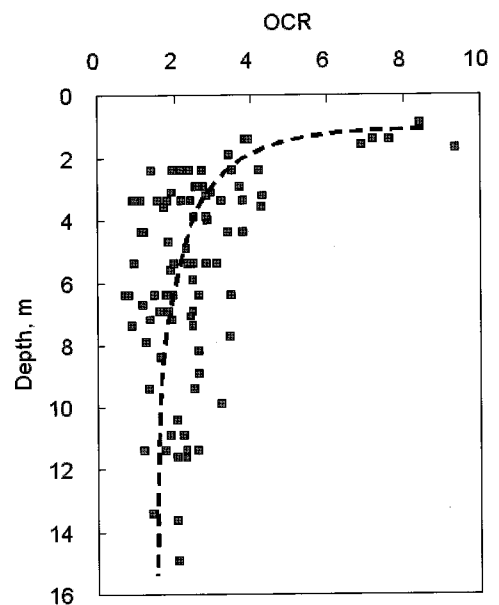


그림 8. 매립전 원지반 과압밀비

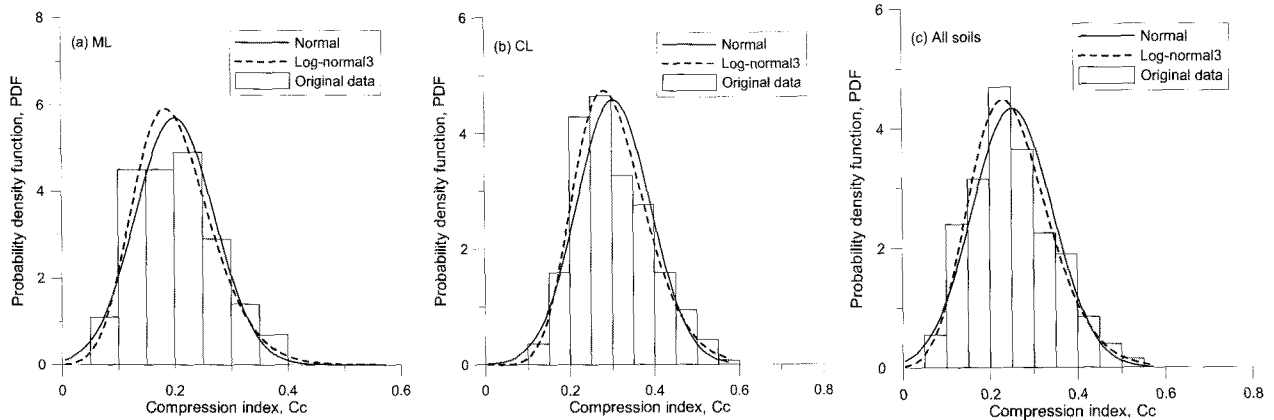


그림 9. 압축지수의 확률분포

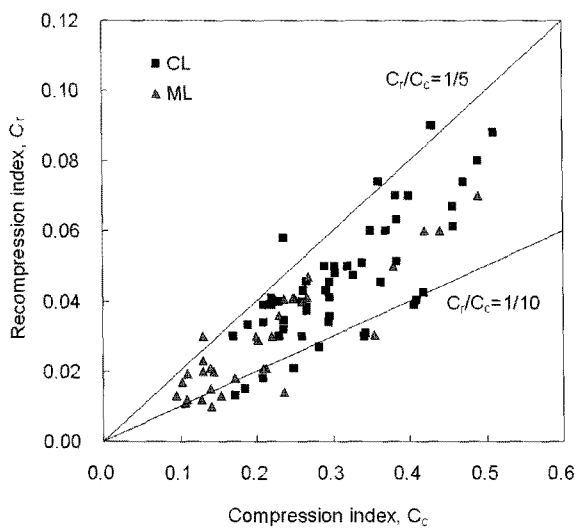


그림 10. 압축지수와 재압축지수 관계

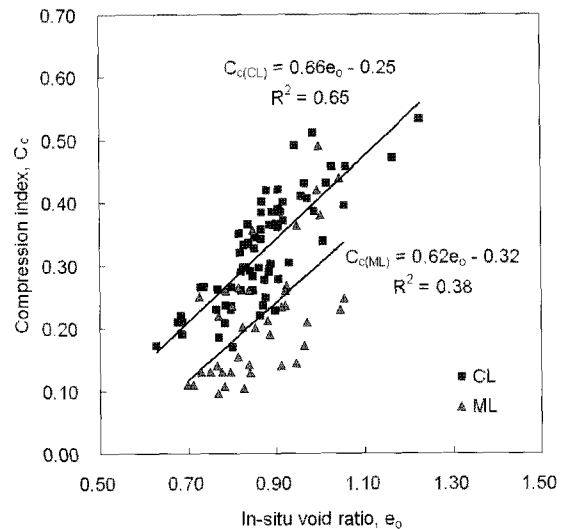


그림 11. 간극비와 압축지수의 관계

다. 현장의 압축지수를 간극비, 함수비, 애터버그한계 등의 지반물성치와 비교한 결과 송도 지반 압축지수는 간극비와의 상관성이 가장 높은 것으로 분석되었다. 압축지수와 간극비의 상관관계 분석 결과는 그림 11과 같으며, ML보다 CL의 압축지수가 간극비와의 상관성이 좋은 것으로 나타났다. 따라서 CL은 간극비를 이용하여 ML보다 상대적으로 신뢰성 높은 압축지수를 개략적으로 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 압밀계수

3.3.1 피에조콘 소산시험을 이용한 압밀계수 추정

피에조콘 소산시험은 특정 깊이에서 콘 관입을 멈추고 시간의 경과에 따른 간극수압 변화를 측정하는 시험으로, 소산시험을 이용하여 압밀계수를 추정하는 이론해들이 여러 학자들에 의해서 제안되었다(임형덕 등, 2003).

이러한 방법으로는 공동확장모델(Torstensson, 1975, 1977), 변형률 경로법(Baligh와 Levadoux, 1986; Teh와 Houlby, 1991), Modified Cam-Clay 모델(Burns와 Mayne, 1998)을 이용한 방법 등이 있다. 이 들 방법 중 Baligh와 Levadoux (1986)의 방법은 압밀계수를 과대평가하고, Torstensson (1977)의 구형 공동팽창 이론해는 압밀계수를 과소평가 하는 경향을 보이는 것으로 보고되고 있다(장인성 등, 2002; 박용원 등, 2003b). 따라서 본 논문에서는 Robertson 등(1992), 박용원 등(2003b), 장인성 등(2002)에 의해서 가장 적절한 현장의 수평압밀계수를 제시하는 것으로 평가된 Torstensson(1977)의 원통형 공동팽창 이론해와 Teh와 Houlby(1991)의 이론해를 사용하여 송도지반의 수평방향 압밀계수를 산정하였다. 또한, 송도지반은 과 입밀비(OCR)가 2 이하의 정규압밀 또는 약간 과압밀된 지반으로 이론해를 사용하여 압밀계수를 평가할 경우 오차는 크지 않을 것으로 판단된다.

Torstensson(1977)과 Teh와 Houlsby(1991)의 방법을 사용함에 있어 가장 중요한 요소는 강성지수를 적절하게 산정하는 것이다. 본 논문에서는 박용원 등(2003a)이 사용한 방법인 비압밀비배수삼축압축시험으로 강성지수를 산정하였다. 강성지수는 지반의 비배수 전단탄성계수와 비배수전단강도의 비(G/s_u)로 산정하며, 포아송비가 0.5일 경우에 식 (1)과 같이 산정할 수 있다.

$$I_r = \frac{G}{s_u} = \frac{E}{3s_u} \quad (1)$$

여기서, E 는 지반의 탄성계수이다. 지반의 탄성계수 및 전단탄성계수는 변형률 수준에 따라서 매우 크게 변하므로 Robertson과 Campanella(1983)는 콘 주변의 복잡한 변형률 장을 고려하여 중간 응력수준의 비배수 할선 전단탄성계수(G_{50})를 선택하는 것이 적절하다고 하였으며, 국내에서는 박용원 등(2003a)이 이러한 방법으로 강성지수를 산정하였다. 본 논문에서도 삼축압축시험에서 파괴점의 절반에 해당하는 응력과 그 때의 축변형률의 비로 할선탄성계수(secant modulus, E_{50})를 구한 후 이 할선탄성계수와 비배수전단강도의 비로 강성지수를 산정하였다. 송도지반의 강성지수는 표 2에서 볼 수 있듯이 흙의 종류에 관계없이 15~43(평균 24)의 범위를 보이는 것으로 나타났으며, 이는 박용원 등(2003a)이 서해안 지역에 대하여 제시한 강성지수의 범위 12~39(평균 27)와 장인성 등(2002)이 송도지역에 인접한 영종도에 대하여 제시한 강성지수 범위 17.9~57.5와 유사한 것으로 나타났다. 이렇게 산정한 강성지수를 이용하여 송도지반의 수평방향 압밀계수를 산정하였으며, 그 결과는 표 2와 같다.

압밀계수 산정결과 점토질 실트(clayey silt)는 점토(clay)와 실트질 점토(silty clay)에 비하여 압밀계수가 평균 약 14~50배 큰 것으로 평가되었으며, 이는 실트층에 점토뿐만 아니라 모래도 함께 혼재되어 있는 송도지

역 지반의 특징 때문인 것으로 판단된다. 따라서 송도지역에 넓게 분포하고 있는 실트층은 배수시간이 점토층에 비하여 매우 빠를 것으로 판단되므로 압밀시간 산정시 이러한 특징을 고려해야 정확한 압밀시간을 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 본 논문에서는 압밀계수의 변동성을 평가하기 위하여 변동계수를 산정해 보았으며, 그 결과를 표 2에 정리하였다. 송도지반의 점토와 실트질 점토의 변동계수는 Lee 등(1983)이 제시한 압밀계수의 변동계수 25~100%(표준 50%)와 유사하거나 약간 큰 것으로 나타났으나, 송도지반의 점토질 실트의 변동계수는 Lee 등(1983)이 제시한 값보다 큰 것으로 나타났다. 이는 실트층에 섞여 있는 점토 및 모래의 양에 따라서 압밀계수가 크게 변하기 때문에 점토질 실트층의 압밀계수 변동계수가 큰 것으로 판단된다.

그림 12는 간극수압 50% 소산시간(t_{50})과 압밀계수의 관계를 흙의 종류에 따라서 나타낸 것이다. 그림 12에서 볼 수 있듯이 실트질 점토의 수평방향 압밀계수는 점토와 실트의 수평방향 압밀계수의 중간에 위치하고 있

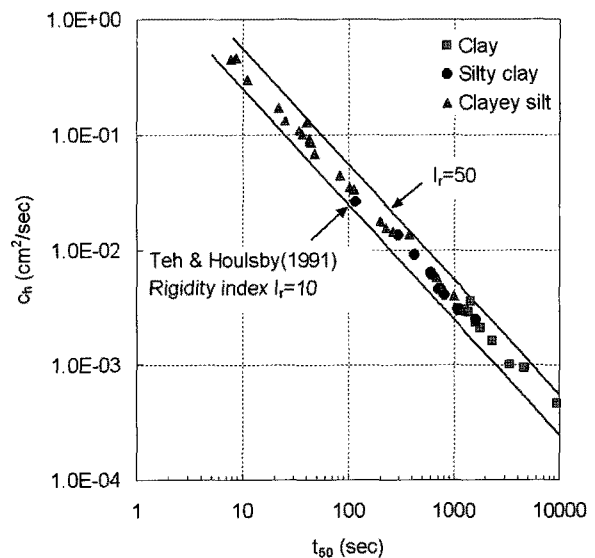


그림 12. 간극수압 50% 소산시간에서의 흙의 종류별 압밀계수 분포

표 2. 강성지수 및 수평방향 압밀계수 산정결과

Soil type	No. of data	Rigidity index		Coefficient of consolidation, $c_v \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$					
				Torstensson (1977)			Teh and Houlsby (1991)		
		Range	Mean	Range	Mean	COV, %	Range	Mean	COV, %
clay	12	15~43	24	0.50~3.86	2.34	51	0.46~3.58	2.07	51
Silty clay	11			2.73~32.00	8.93	94	2.45~26.20	7.65	90
Clayey silt	23			3.47~517.0	117.84	127	3.02~462.0	103.59	126

주) 압밀계수는 소산도 50%에서 결정된 값이며, 간극수압은 콘선단 바로 뒤(u_2)에서 측정

며, 강성지수가 흙의 종류에 관계없이 유사한 범위를 보이고 있어 직선에 가까운 관계를 보이고 있는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 지반조사를 통하여 흙의 종류를 구분하면 그림 12를 이용하여 송도지반의 개략적인 수평방향 압밀계수를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3.2 표준압밀시험을 이용한 압밀계수 추정

(1) 압밀계수 분포특성

압밀계수는 피에조콘 소산시험뿐만 아니라 표준압밀시험을 이용하여 산정할 수 있으며, 본 논문에서는 송도 지역에서 수행된 표준압밀시험결과를 이용하여 수직방향 압밀계수를 깊이에 따라 산정하였다. 깊이에 따른 압밀계수 분포 경향은 그림 13에서 볼 수 있듯이 CL, ML 모두 깊이 E.L.-13m까지는 깊이가 증가함에 따라서 압밀계수가 일정하거나 약간 감소하는 경향을 보인다. 그러나 CL의 경우에는 E.L.-13m 이하부터는 상부층보다 상대적으로 매우 작은 압밀계수를 보이며, 이는 전술한 바와 같이 약 E.L.-15m 내외부터 매우 견고한 점토층이

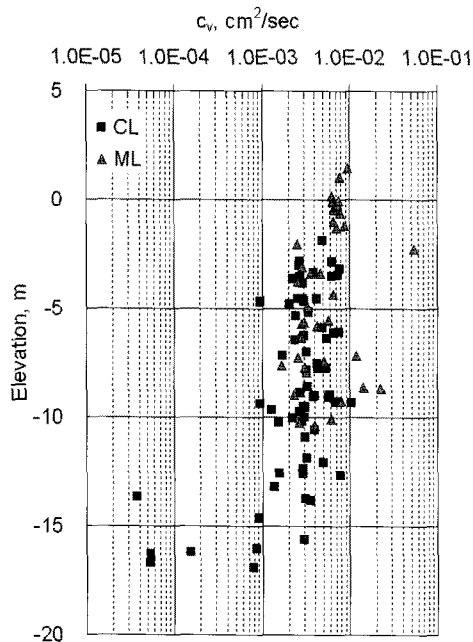


그림 13. 깊이에 따른 압밀계수

출현하기 시작할 뿐만 아니라 심도가 증가할수록 세립분의 함유량이 증가하여 압밀계수가 급격하게 감소하는 것으로 판단된다.

수직방향 압밀계수의 대표값 및 변동성을 파악하기 위하여 흙 종류 및 심도에 따른 압밀계수 평균 및 변동계수를 산정하였으며, 그 결과는 표 3과 같다. 흙의 종류에 따른 압밀계수의 평균은 CL의 경우 표고 E.L.-5 ~ -13m 구간에서는 $3.86 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$, E.L.-13 ~ -17m 구간에서는 $1.27 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 의 값을 보이고 있으며, ML은 E.L.+2 ~ -11m 구간에서 $7.13 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 의 값을 보이고 있다. 변동계수 산정결과 ML과 E.L.-13 ~ -17m 사이에 분포하는 CL층의 변동계수가 E.L.-5 ~ -13m 사이에 분포하는 CL층의 변동계수보다 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 이러한 경향은 피에조콘 소산시험으로 산정한 수평방향 압밀계수의 변동계수와 유사한 것으로 나타났다.

전술한 바와 같이 압밀계수는 약 E.L.-13m까지 심도에 따라서 거의 일정한 경향을 보이므로 CL, ML, CL과 ML 자료를 합하였을 경우에 대하여 수직방향 압밀계수의 확률분포를 산정해 보았다. 확률분포형과 매개변수 추정방법은 압축지수에서 사용한 방법과 동일하다. K-S 검정방법을 이용하여 확률분포형의 적합성을 판정한 결과 ML의 경우(그림 14(a))에는 유의수준 0.05에서 모든 확률분포형이 적합한 것으로 평가되었으며, CL(그림 14(b))은 유의수준 0.05에서 대수정규분포는 적합하였으나 정규분포는 유의수준 0.05, 0.01 모두에서 적합하지 않은 것으로 나타났다. 이는 그림 14(b)에서 볼 수 있듯이 CL의 분포가 왼쪽으로 치우쳐 있기 때문에 대칭분포인 정규분포는 적합하지 않은 것으로 판단된다. ML과 CL을 합한 자료를 이용한 경우(그림 14(c))에는 유의수준 0.05에서 대수정규분포만 적합한 것으로 나타났으며, 유의수준 0.01에서는 정규분포도 만족하는 것으로 나타났다. 수직방향 압밀계수의 경우에는 그림 14에서 볼 수 있듯이 분석자료들이 왼쪽으로 치우진 분포를 보이므로 대수정규분포가 정규분포보다 더 적합한 것으

표 3. 흙의 종류에 따른 수직방향 압밀계수 산정결과

Soil type	Elevation, m	No. of data	Coefficient of consolidation, $c_v \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$		
			Range	Mean	COV, %
CL	E.L.-5~-13	57	0.936~10.4	3.86	51
	E.L. -13~-17	11	0.0376~3.56	1.27	106
ML	E.L. 2~-11	39	1.67~54.0	7.13	121

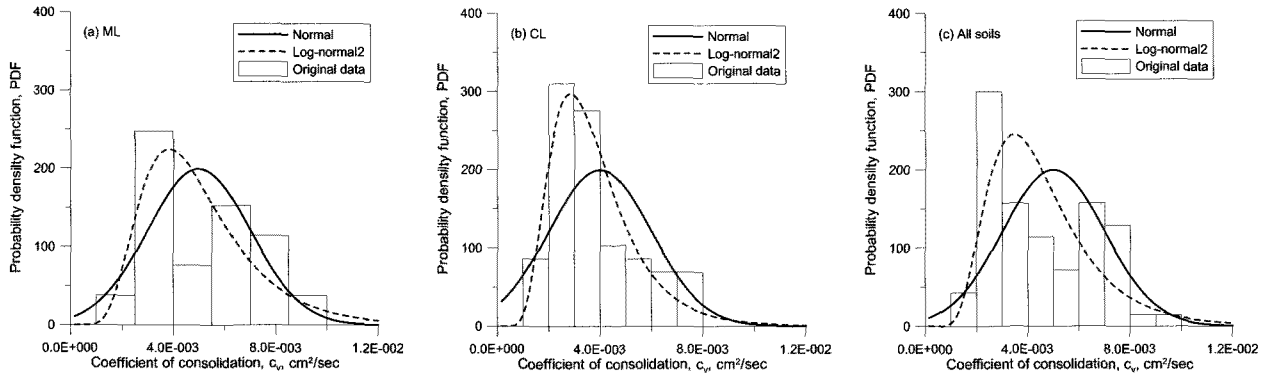


그림 14. 수직방향 압밀계수의 확률분포

로 판단된다. 그림 14에서 Log-normal2는 2변수 대수정 규분포를 의미한다.

(2) 압밀계수의 이방성

압밀계수의 이방성을 평가하기 위하여 분석자료 중 동일한 위치에서 수직방향과 수평방향으로 시료를 성형한 후 압밀시험을 수행하여 각각의 방향에 대한 압밀계수를 산정한 결과를 분석하였다. 분석결과 송도지반은 수평방향 압밀계수와 수직방향 압밀계수의 비가 약 1.08~1.76(평균 1.34)의 범위를 보이는 것으로 나타났다. 그러나 실내압밀시험은 시료의 크기가 작고 교란의 영향을 받아 정확한 압밀 및 투수특성을 평가하는데 한계가 있다. 실내시험에 사용하는 시료의 크기는 평가하고자 하는 지반특성을 얻을 수 있는 대표시료크기(representative elementary volume, REV)보다 작아 현장에 존재하는 얇은 층 등의 특성을 고려하지 못할 가능성이 있다(Bear, 1979). 또한, 시료가 교란될 경우에는 시험결과가 현장 지반을 대표하지 못한다(Robertson 등, 1992). 따라서 실내시험은 정확한 이방성을 추정하기 어려운 단점이 있음을 주지할 필요가 있다. 분석대상 자료 중 표준압밀시험과 피에조콘 소산시험을 동시에 수행한 2개소의 자료에 따르면 수평방향 압밀계수와 수직방향 압밀계수의 비가 각각 1.62, 2.58로 나타나 표준압밀시험으로 산정한 이방성보다 크게 산정되었다. 시험자료의 수가 적어 단정하기는 어려우나 피에조콘 소산시험은 현장에 존재하는 얇은 실트 및 모래층이 고려된 수평방향 압밀계수를 평가할 가능성이 크기 때문에 피에조콘 소산시험으로 평가한 이방성이 표준압밀시험으로 평가한 이방성보다 큰 것으로 판단된다.

3.4 투수계수

3.4.1 투수계수 분포특성

투수계수는 압밀계수와 함께 압밀시간에 큰 영향을 미치는 중요한 지반정수이다. 본 논문에서는 표준압밀 시험을 이용하여 흙의 종류에 따른 투수계수를 분석하였다. 투수계수를 직접적으로 측정하는 방법들에 비하여 압밀시험으로 산정한 투수계수는 상대적으로 신뢰성이 떨어질 가능성이 있다. 따라서 본 논문에서는 투수계수의 절대적인 값을 제시하는 것 보다는 흙의 종류 및 심도에 따른 투수계수 분포특성 제시에 더 큰 목적이 있다. 압밀시험에서의 투수계수는 압밀계수를 이용하여 산정하게 되므로 흙의 종류별 깊이에 따른 투수계수 분포경향은 그림 13의 압밀계수 분포경향과 유사하다. 표 4에서 볼 수 있듯이 E.L-5~-13m 사이에 분포하는 CL의 투수계수는 $0.16 \sim 51.0 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ (평균 $3.0 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$)의 범위를 보이고 있으며, 실트와 모래성분이 많이 포함되어 있는 시료의 값을 제외하면 $0.16 \sim 2.20 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ (평균 $0.79 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$)의 범위를 보이고 있다. E.L+2~-11m 사이에 분포하는 ML의 투수계수는 깊이에 따라서 일정한 경향을 보이고 있으며, $0.38 \sim 25.4 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ (평균 $2.86 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$)의 범위를 보이는 것으로 나타났다. 투수계수의 변동성을 평가하기 위하여 변동계수를 산정하였으며, 산정결과를 표 4에 정리하였다. 표 4에서 볼 수 있듯이 대부분의 다른 시험결과들보다 큰 투수계수를 보이고 있는 4개의 자료를 제외한 후 산정한 E.L-5~-13m 사이에 분포하는 CL의 변동계수는 56%, ML의 변동계수는 215%로 나타났다. 이와 같이 투수계수의 변동계수가 큰 이유는 CL 또는 ML로 분류되는 지반 일지라도 다른 종류의 흙이 어느 정도 혼재되어 있을

표 4. 흙의 종류에 따른 수직방향 투수계수 산정결과

Soil type	Elevation, m	No. of data	Permeability, $k_v \times 10^{-7}$ cm/sec			Remarks
			Range	Mean	COV, %	
CL	E.L-5~-13	57	0.16~51.0	3.00	288	All data
		53	0.16~2.20	0.79	56	Exception of 4 data (silty and sandy clays)
	E.L -13~-17	11	0.0061~0.64	0.20	113	-
ML	E.L 2~-11	39	0.38~25.4	2.86	215	-

가능성이 높기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 실내압밀 시험에 의하여 간접적으로 투수계수를 산정하는 시험 오차도 큰 변동계수의 원인일 것으로 판단된다.

3.4.2 투수계수의 이방성

투수계수의 이방성을 평가하기 위하여 압밀계수 이방성 분석에서와 같이 분석자료 중 동일한 위치에서 수직방향과 수평방향으로 시료를 성형한 후 압밀시험을 수행하여 각각의 방향에 대한 투수계수를 산정한 결과를 비교하였다. 송도지반은 수평방향 투수계수와 수직방향 투수계수의 비(k_h / k_v)가 약 0.94~1.89(평균 1.36)로 Baligh와 Levadoux(1980)가 제시한 층상이 없는 지반의 값을 보이고 있다. 그러나 전술한 바와 같이 표준 압밀시험에 의한 결과는 시료의 크기가 매우 작아 송도 현장에 실제로 존재하는 점토층 내부의 얇은 실트 및 모래층의 특성을 반영하지 못했을 가능성이 있을 것으로 판단된다. 따라서 표준압밀시험만으로 투수계수의 이방성을 평가하는 것보다는 현장투수시험 또는 블록 샘플을 이용한 시험결과와 병행하여 최종 이방성을 평가해야 할 것이다. 또한, 이러한 방법으로 투수계수의 이방성을 평가하는 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

3.4.3 간극비와 투수계수 관계

흙과 같이 간극을 가지고 있는 매체의 투수계수는 흙 자체의 고유치가 아니며 흙을 구성하고 있는 점토광물, 간극의 크기, 모양, 분포 및 물의 점성 등에 의하여 영향을 받는다. 그 중에서도 간극비가 투수계수에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 간극비와 투수계

수의 관계를 규명하는 연구가 지속되어 왔다. 이러한 간극비와 투수계수와의 관계식은 사질토에 적용 가능한 Kozeny(1927)와 Carman(1956)의 제안 식 이후로 많은 연구가 이루어져 왔으며, 특히 점토에 적용시킬 수 있는 식들이 제안되었다. 점토의 투수계수와 간극비의 관계는 Taylor(1948), Samarasinghe 등(1982), Mesri와 Olson(1971), Mesri와 Rokhsar(1974) 등에 의해서 연구되었으며, 식 (2)와 같은 관계식이 가장 많이 사용되고 있다.

$$\log k = \log k_0 - \frac{e_0 - e}{C_k} \quad (2)$$

여기서, C_k 는 투수계수변화지수(permeability change index) 이고, k_0 , e_0 는 in-situ 상태의 투수계수와 간극비이다. Mesri와 Rokhsar(1974)는 지반공학적인 변형을 범위, 즉 현장에서 발생할 수 있는 변형을 범위 내에서 식 (2)의 관계를 적용할 수 있다고 하였다. 송도지반의 흙의 종류별 투수계수변화지수를 산정한 결과는 표 5와 같으며, CL이 0.17~0.74(평균 0.384), ML이 0.08~0.64(평균 0.308)의 범위를 보이는 것으로 나타났다. 또한, CL의 투수계수변화지수가 ML의 투수계수변화지수보다 크며, 투수계수변화지수의 변동계수는 CL이 ML보다 작은 것으로 나타났다.

투수계수변화지수 C_k 값은 간극비에 따른 투수계수의 변화 정도를 나타내는 지수이며, 초기간극비와 식 (3)과 같은 경험적인 식으로 표현된다.

$$C_k = 0.5e_0 \quad (3)$$

식 (3)은 단지 투수계수변화지수와 초기간극비 사이

표 5. 흙의 종류에 따른 투수계수변화지수

Soil type	No. of data	Range	Mean	COV, %
CL	45	0.17~0.74	0.384	35
ML	32	0.08~0.64	0.308	61

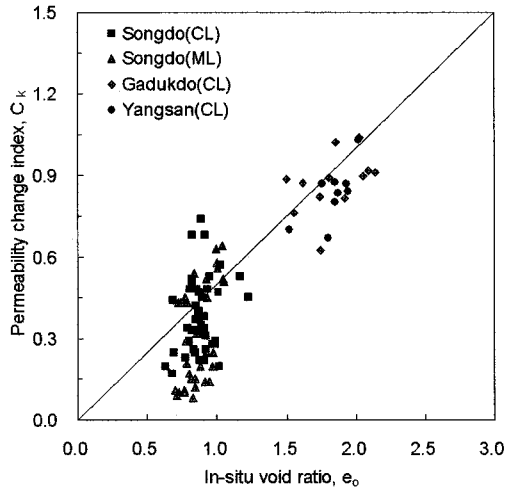


그림 15. 투수계수변화지수와 초기간극비와의 관계

의 경험적인 식이므로 이 식을 이용하여 직접적으로 정확한 투수계수변화지수를 구할 수는 없지만, 대략적인 투수계수변화지수를 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 송도지반의 투수계수변화지수와 초기간극비와의 관계는 그림 15와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 송도지반의 CL 및 ML은 김동휘 등(2001)이 국내의 대표적인 점토인 양산과 가덕도 점토에 대하여 제시한 결과보다 식 (3)을 잘 만족하지는 않는 것으로 나타났다. 특히, ML의 투수계수변화지수는 일반적으로 $0.5e_0$ 보다 작은 것으로 나타났으며, 이는 간극비의 변화에 따른 투수계수의 변화가 점토보다 작음을 의미하는 것으로 판단된다. 따라서 송도지반의 투수계수변화지수를 단순히 초기간극비로 예측할 경우에는 큰 오차가 발생할 가능성이 있으므로 식 (4)의 사용에 유의해야 할 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 논문에서는 압밀침하량 및 압밀시간에 영향을 미치는 압밀특성을 송도지반에서 수행된 현장 및 실내시험 자료를 분석하여 평가하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 매립 후 송도지반의 과압밀비는 1.0~1.5 사이로 정규압밀 또는 약간 과압밀된 상태로 나타났다. 또한, 매립 전 송도지반은 과압밀된 지반으로 분석되었다.
- (2) 퇴적층의 압축지수 분석결과 CL이 평균 0.32, ML이 평균 0.24의 값을 보이는 것으로 나타났으며, 송도지반의 물리적 특성 중 간극비와의 상관성이 가장 좋은 것으로 나타났다. 과압밀상태에서의 압밀

침하량 평가에 사용되는 재압축지수는 압축지수의 1/5~1/10 사이에 분포하는 것으로 나타났다.

- (3) 압밀속도에 영향을 미치는 압밀계수는 송도지반에 분포하는 흙의 종류에 따라서 큰 차이를 보였으며, 그 크기는 점토질 실트(clayey silt), 실트질 점토(silty clay), 점토(clay) 순으로 나타났다. 압밀계수는 깊이 E.L-13m까지는 거의 일정한 분포경향을 보이는 것으로 나타났으나, 그 하부에서는 압밀계수가 급격하게 감소하는 것으로 분석되었다. 수평방향과 수직방향 압밀계수의 비를 실내압밀시험으로 평가한 결과 1.08~1.76(평균 1.34)의 범위를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 피에조콘 소산시험 결과 압밀계수의 이방성이 대략 1.62~2.58로 평가되었으며, 이는 실내시험으로 평가한 이방성보다 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과는 현장시험인 콘 소산시험이 송도지반에 분포하고 있는 점토층 내의 실트와 모래층의 특성을 실내시험에 비하여 상대적으로 잘 반영했기 때문인 것으로 판단된다.
- (4) 깊이에 따른 투수계수 분포경향은 압밀계수와 동일한 것으로 나타났으며, 간극비 감소에 따른 투수계수의 변화 정도를 나타내는 투수계수변화지수를 산정한 결과 CL은 0.14~0.74(평균 0.384), ML은 0.08~0.64(평균 0.308)의 범위를 보이는 것으로 나타났다.
- (5) 압축지수 및 압밀계수에 대한 확률분포를 분석한 결과 압축지수는 대칭인 분포를 보이고 있어 정규분포, 대수정규분포 모두 적합한 것으로 나타났으나, 압밀계수는 왼쪽으로 치우친 분포를 보이고 있어 대수정규분포가 상대적으로 적합한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 포스코건설의 “송도 매립지반 지반조사자료 DATABASE 구축 및 압밀침하량 평가” 연구과제의 일부분으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 국토해양부 (2008), *국토건설공사 설계실무 요령*, 서울, 이엔지북, pp.62.
2. 김동휘, 김진원, 임형덕, 김대규, 이우진 (2001), “실내시험을 통한 양산점토의 투수특성 평가”, *한국지반공학회논문집*, 제17권, 제4호, pp.249-257.

3. 김동휘, 안신환, 김재정, 이우진 (2009), “인천 송도지역 지반의 변동성 분석”, *한국지반공학학회논문집*, 제25권, 제6호, pp.73-88.
4. 박용원, 구남실, 김영상 (2003a), “피에조콘 시험을 위한 국내 연약지반의 대표적 강성지수 도출과 수평압밀계수 산정에의 적용”, *대한토목학회논문집*, 제23권, 제6C호, pp.389-398.
5. 박용원, 구남실, 이상익 (2003b), “피에조 콘 시험을 이용한 점성토의 압밀계수 추정”, *한국지반공학학회논문집*, 제19권, 제4호, pp.311-320.
6. 임형덕, 이우진, 김대규 (2003), “정규압밀점토에서의 피에조 콘 소산시험을 이용한 수평압밀계수의 산정”, *한국지반공학학회논문집*, 제19권, 제5호, pp.145-154.
7. 장인성, 이선재, 정충기, 김명모 (2002), “CPTu를 이용한 국내 점성토 지반의 압밀계수 산정”, *대한토목학회논문집*, 제22권, 제 1-C호, pp.67-79.
8. 지창열 (2009), “송도 국제도시 준설매립지반의 다짐도 개선 및 적용 사례”, *인천 특별 학술발표회 논문집*, 한국지반공학회, 인천광역시, pp.158-177.
9. 최현길 (2009), “송도 국제도시 개발계획에 대한 개관”, *인천 특별 학술발표회 논문집*, 한국지반공학회, 인천광역시, pp.3-27.
10. Baligh, M. M., and Levadoux, J. L. (1980), “Pore Pressure Dissipation after Cone Penetration”, Massachusetts Institute of Technology Department of Civil Engineering, Research Report R80-11.
11. Baligh, M. M., and Levadoux, J. L. (1986), “Consolidation after undrained piezocone penetration. II: Interpretation”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.112, No.7, pp.727-745.
12. Bear, J. (1979), *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill Inc, New York, pp.29.
13. Burns, S. E., and Mayne, P. W. (1998), “Monotonic and Dilatory Pore-Pressure Decay during Piezocone Tests in Clay”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.35, pp.1063-1073.
14. Carman, P. C. (1956), *Flow of gases through porous media*, Butterworths, London.
15. Kozeny, J. S. (1927), “Über Kapillare Leitung des wassers im Boden”, *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien, Abteilung IIa*, pp.136.
16. Lee, I. K., White, W., and Ingles, O. G. (1983), *Geotechnical Engineering*, Boston, Pitman, pp.57-88.
17. Mesri, G. and Olson, R. E. (1971), “Mechanisms controlling the permeability of clays”, *Clays and Clay Minerals*, Vol.19, pp.151-158.
18. Mesri, G. and Rokhsar, A. (1974), “Theory of consolidation for clays”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.100, GT8, pp.889-904.
19. Robertson, P. K. (1990), “Soil Classification using the Cone Penetration Test”, *Canadian Geotechnical Journal*, 27(1), pp.151-158.
20. Robertson, P. K., and Campanella, R. G. (1983), “Interpretation of Cone Penetrometer test: Part II: Clay”, *Canadian Geotechnical Journal*, 20(4), pp.734-745.
21. Robertson, P. K., Sully, J. P., Woeller, D. L., Lunne, T., Powell, J. J. M., and Gillespie, D. G. (1992), “Estimating coefficient of consolidation from piezocone tests”, *Canadian Geotechnical Journal*, 29, pp.539-550.
22. Samarasinghe, A. M., Huang, Y. H., and Drnevich, V. P. (1982), “Permeability and Consolidation of Normally Consolidated soils”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.108, GT6, pp.835-850.
23. Tavenas, F., Leblond, P., Jean, P., and Leroueil, S. (1983a), “The Permeability of Natural Soft clays. Part I: Methods of Laboratory Measurement”, *Canadian Geotechnical Journal*, 20, pp.629-644.
24. Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P., and Leroueil, S. (1983b), “The Permeability of Natural Soft clays. Part II: Permeability characteristics”, *Canadian Geotechnical Journal*, 20, pp.645-660.
25. Taylor, D. W. (1948), *Fundamentals of soil mechanics*, John Wiley & Sons Inc., New York, pp.700.
26. Teh, C. I., and Houslyby, G. T. (1991), “An analytical study of the cone penetration test in clay”, *Geotechnique*, 41, No.1, pp.17-34.
27. Torstensson, B. A. (1975), “Pore pressure sounding instrument”, *Proceedings, ASCE Specialty Conference on In Situ Measurement of Soil Properties*, Raleigh, N. C., Vol.2, pp.48-54.
28. Torstensson, B. A. (1977), “The pore pressure probe”, *Nordiske Mote, bergmekanikk*, Oslo, Norway, Paper 34, pp.48-54.

(접수일자 2009. 8. 6, 심사완료일 2009. 12. 28)