

실내압밀시험과 GIS 기법을 이용한 대규모 매립지역의 장기침하량 예측

A Prediction of Long-Term Settlement in Large Reclaimed Sites Using Laboratory Consolidation Tests and GIS Techniques

박사원* · 김홍택** · 박성원*** · 백승철**** · 박상권*****

Park, Sa-Won · Kim, Hong-Taek · Park, Sung-Won · Baek, Seung-Cheol · Park, Sang-Kwon

Abstract

The secondary consolidation settlement of soft clay is generally very little compared to the total settlement and occurs very slowly during long-term period. However the secondary consolidation settlement is comparatively large amount in organic and heavily compressed clay and is a very important engineering factor. In order to reduce residual settlements in reclaimed soft ground, the preloading method is often used. In this study, in order to determine reasonable long-term settlements of large reclaimed site, laboratory incremental loading consolidation tests and surcharging consolidation tests are performed. Sampling was done at Incheon area of west coast and Gwangyang area of south coast in Korea. The characteristics of secondary consolidation have obtained through laboratory tests and analyzed systematically to predict long-term settlements. Additionally, the location data and laboratory test results are correlated by using GIS(geographic information system). The secondary consolidation settlement of the site was predicted based on D/B and the operation technique and estimation technique of space of GIS.

Keywords : Secondary consolidation settlements, Incremental loading consolidation tests, Surcharging consolidation tests, GIS technique

요 지

연약 점토지반에서의 2차 압밀침하량은 일반적으로 전체 압밀침하량에 비해 미소하고 2차 압밀까지의 종료시간도 상당히 길기 때문에 이를 무시하는 경우가 많으나 유기질 또는 고압축성의 점토에서는 비교적 큰 침하량이 발생하기 때문에 중요한 공학적 요소로 간주된다. 이러한, 준설매립지반의 잔류침하량을 저감시키기 위해선 선행재하공법(preloading)이 주로 적용된다. 본 연구에서는 대규모 매립지역의 장기침하량을 보다 합리적으로 결정하기 위하여 실내에서 단계재하 압밀시험 및 surcharging 압밀시험 등을 수행하였다. 서해안(인천) 및 남해안(광양) 일대의 대규모 준설매립지역에서 시료를 채취했으며, 이 지역내 준설점토의 2차 압밀특성치들을 실험으로 규명하여 장기침하량 예측에 필요한 기초자료로 활용하였다. 또한, 지리정보체계(geographic information system, 이하 GIS)의 위치정보(수치지도)에 지반정보(속성자료)를 접목시켜 해당지역의 자료를 D/B화 한 후, GIS의 연산기능 및 공간추정 기능 등을 활용함으로써 대규모 준설매립지역의 2차 압밀침하량을 예측하였다.

주요어 : 2차압밀침하량, 단계재하압밀시험, Surcharging 압밀시험, 지리정보체계

- * 비회원 · 홍익대학교 토목공학과 박사과정
- ** 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 교수
- *** 비회원 · 유신코퍼레이션 지반공학부 부장
- **** 정회원 · 안동대학교 토목공학과 교수
- ***** 비회원 · 홍익대학교 토목공학과 박사과정

1. 서론

산업화와 도시화의 영향으로 건설용지의 부족, 지가의 상승으로 말미암아 입지조건이 열악한 해안가의 매립지에 항만, 공항, 공장 등이 건설되고 있다. 해안매립지는 대부분 연약지반으로 구조물 건설 전에 적절한 연약지반 처리가 필요하다. 연약지반 처리를 위해서는 사전조사에 의한 지반조사와 실내시험이 수행되고 시공 중에도 동일한 방법의 조사가 필요하며 시공 후에는 품질관리 및 기술자료로 이용을 위한 사후조사 등이 수행된다. 그러나, 대규모 매립지 조사에는 많은 비용과 시간, 인력이 소요되므로 경제적, 시간적 제약이 따르며 장기침하량 예측에도 상당한 어려움이 따른다. 본 연구에서는 대규모 매립지역의 2차 압밀침하량을 보다 합리적으로 결정하기 위하여 실내에서 단계 재하 압밀시험 및 surcharging 압밀시험 등을 수행하였다. 대상지역은 서해안(인천공항) 및 남해안(광양항) 일대의 대규모 매립지를 선정하였으며, 이 지역내 준설점토의 2차 압밀특성치들을 실험으로 얻어내어 장기침하량 예측에 필요한 기초자료로 활용하였다. 기존 연구(김진홍, 2000)에서는 활성 2차압축지수(C''_a)를 Mesri와 Feng(1991)이 제시한 그래프를 이용하여 도해적으로 유추하였지만, 국내와 같이 서해안과 남해안의 점토성분이 현저하게 다르고 다양한 압밀특성을 지닌 점토에 대해 동일한 그래프를 일률적으로 적용한다는 데에는 분명 한계가 있기 때문에 본 연구를 수행하였다. 아울러, 본 연구에서는 지리정보체계의 위치정보에 지반정보(속성자료)를 접목시켜 해당지역의 자료를 D/B화 하였다. GIS의 연산기능 및 공간추정 기능(크리깅 기법) 등을 활용함으로써 한정된 조사자료나 실내압밀시험결과를 토대로 대규모 준설매립지역의 2차 압밀침하량을 보다 효과적으로 예측하고자 하였다.

2. 점토의 2차 압밀거동 특성

2.1 가정 A와 가정 B

2차 압밀(secondary consolidation)은 1차 압밀동

안의 체적변형의 연속이며, 상당히 느린 속도로 진행된다. 또한 과잉간극수압이 소산된 이후에도 계속된다는 점에서 1차 압밀과는 크게 다르다. 2차 압밀침하량을 계산하기 위한 방법에서 가장 중요하면서도 의견이 분분한 사항은 2차 압밀침하를 어떻게 산정할 것인가에 있다. 2차 압밀침하량은 산정하는 방법에 따라 가정 A(Hypothesis A)와 가정 B(Hypothesis B)로 나뉘어 진다(Ladd 등, 1977 ; 김운태, 2005). 가정 A에서는 1차 압밀이 끝난 후에 2차 압밀이 일어난다고 가정하고, 1차 압밀과 2차 압밀을 구분하여 침하량을 개별적으로 산정한다. Mesri와 Choi(1985)는 1차 압밀 종료시(end of primary consolidation, EOP)의 변형은 유일하다고 보고하였다. 즉, 크리프는 과잉간극수압이 완전히 소산된 후에만 유발된다고 가정하고, C_a/C_c 의 비는 주어진 점토에 대하여 일정하다고 생각하였다. 반면, 가정 B에서 2차 압밀은 1차 압밀과 관계없이 압밀 전체과정 동안에 일어난다고 가정하여 압밀침하량을 계산한다. EOP 응력-변형률 곡선은 시료두께에 의존하고 1차 압밀 동안에도 크리프 변형이 유발된다. 따라서, 1차 압밀이 일어나는 동안 2차 압밀을 동시에 고려해야 하기 때문에 구성방정식 및 연속방정식 등을 유도하여 복잡한 수치해석적 계산과정을 거쳐야 한다. 본 연구에서는 가정 A에 바탕을 두어 2차 압밀침하량을 산정하였다.

2.2 선행재하공법에 따른 2차 압축지수들 (C'_a 및 C''_a)

일반적으로 압밀소요시간은 선행재하공법에 의해 감소시킬 수 있으며, 그림 1과 같은 양상을 보인다. 부지계획고 조성을 위해 소정의 압밀도(약 90~95%)에 이르면 상재하중의 일부를 제거하게 되는데, 상재하중의 제거는 1차 리바운드(t_{pr})와 2차 리바운드(t_l)를 유발시키게 되고, 그림 1과 같이 t_l 경과 이후 2차 압밀이 발생하게 된다. 2차 압밀침하량은 기울기 C'_a 또는 C''_a 에 의해 결정되며, 앞 절에서 언급한 C_a 와는 구분하여 표기한다.

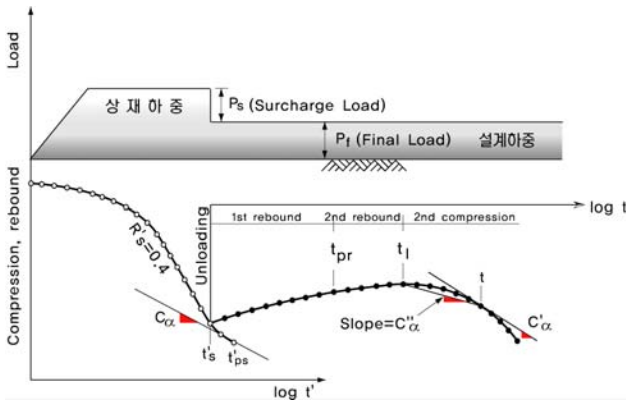


그림 1. 선행재하공법에 따른 2차 압밀거동 특성 (Mesri와 Feng, 1991)

여기서,

- t'_s : 선행재하시간(성토하중 제거시점)
- t'_{ps} : 선행재하하에서 1차 압밀완료(EOP)에 이르는 시간
- t_{pr} : 선행하중의 제거후 1차 리바운드까지의 시간
- t_l : 1차 리바운드 후 2차 압밀침하 발생전까지 시간
- C'_α : 임의의 시간(t)에 있어서의 2차 압축지수(접선 2차 압축지수)
- C''_α : t_l 과 임의의 시간까지의 2차 압축지수(할선 2차 압축지수)
- R'_s : 성토단계의 상재하중 재하비

일반적으로 그림 1에서 정의한 상재하중 제거 후의 접선 2차 압축지수 C'_α 는 초기에는 작은 값을 나타내나, 시간의 경과와 함께 서서히 증가하게

된다. 그러나, C'_α 와 C_c 사이의 관계는 시간에 따른 값의 변화가 반영되지 못할 뿐 아니라, 실용적인 목적에 부합하지 못하는 단점이 있다. 따라서, 2차 리바운드 완료시점(t_l)에서부터 2차 압밀침하량을 측정하려는 임의의 시간(t)까지의 기울기인 할선 2차 압축지수(C''_α , Secant secondary compression index)값을 사용하는 것이 바람직하다(Mesri와 Feng, 1991).

$$S_{2nd} = \frac{C''_\alpha}{1+e_p} L_p \log \frac{t}{t_l} \quad (1)$$

$$= \frac{C''_\alpha}{C_\alpha} \cdot \frac{C_\alpha}{C_c} \cdot C_c \log \frac{t}{t_l}$$

여기서,

- e_p : 1차 압밀완료 후의 간극비
- L_p : 1차 압밀완료 후의 연약층 두께

선행재하공법에서의 2차 압밀침하량은 그림 2와 같이 기존 연구결과 등을 참조하여 C''_α/C_α 를 도해적으로 찾아낸 후, 상기의 식에 대입하면 구할 수 있다.

3. 실내압밀시험

3.1 시험목적

본 연구에서는 실제 현장에서 성토하중을 재

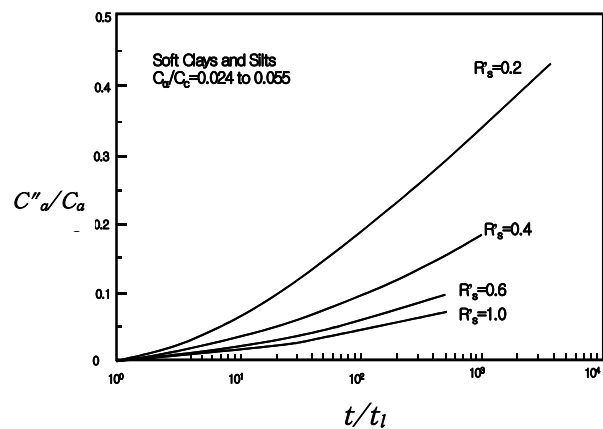
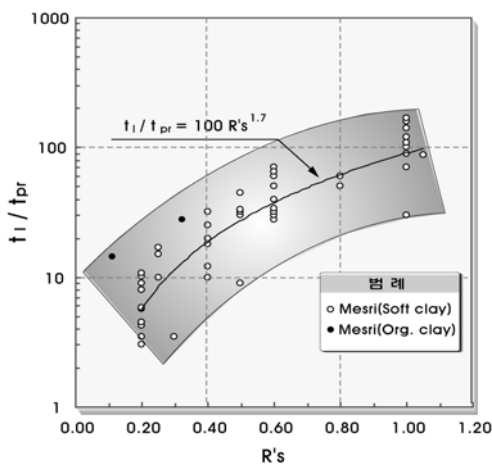


그림 2. 상재하중비-시간-압축지수와의 관계(Mesri와 Feng, 1991)

하하고 단계적으로 제거하는 경우의 연약지반의 거동특성을 모사하기 위해 단계재하 압밀시험과 surcharging 압밀시험 등을 수행하여 $C'_a/C_a - t/t_l$ 관계 및 $t_l/t_{pr} - R'_s$ 의 관계를 규명하고자 한다. 인천국제공항 일대(서해안)와 최근 개발이 활발히 이루어지고 있는 광양항 일대(남해안)의 대규모 준설패립지를 대상으로 하여 기본 역학시험, 물성시험 및 실내압밀시험 등을 수행하고, 이 결과들을 정리하여 2차 압밀침하량 예측을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

3.2 대상지반의 특성

3.2.1 서해안 준설패립지반의 공학적 특성

서해안의 인천국제공항 부지의 지층구분은 상부로부터 상부 해성층, 상부 충적층, 하부 해성층, 하부 충적층, 풍화 잔류토 및 암반으로 구성되어 있다. 실내압밀시험이 시행된 인천지역 준설패립토의 물리·역학적 특성은 표 1에 요약·정리되어 있다.

3.2.2 남해안 준설패립지반의 공학적 특성

남해안 지역에 위치한 광양항 동측배후단지 2단계 구간(해수부 43 만평)은 N값 5이하의 심도가 평균 16.7m, 최대 24.5m(준설패립토+원지반점토) 두께로 분포되어 있고 illite 계통의 고소성 점토광물로 구성된 해성점토층이 주를 이루고 있다. 지층구분은 상부로부터 준설패립토, 원지반점토, 퇴적층, 풍화토층, 풍화암층 및 암반으로 구성되어 있으며, 물리·역학적 특성은 표 2에 요약·정리되어 있다.

표 1. 인천지역 준설패립토의 역학적 특성 및 물리적 특성

항목	자연함수비 (%)	액성한계 (%)	소성한계 (%)	초기 간극비	압축 지수	압밀계수 (cm ² /sec)	비배수강도 (kPa)
범위	30~50	26~50	10~20	0.9~1.3	0.233	(3~5)×10 ⁻³	10.0 ~ 25.0

항목	비중	#200번체 통과량(%)	균등 계수	γ_{dmax} (kN/m ³)	투수계수 (cm/sec)	실내 CBR	분류
범위	2.65~2.66	7.0~10.1	1.5~3.0	17.8~18.0	(1.0~8.1)×10 ⁻⁵	19.1~22.5	SP-SM

표 2. 광양지역 준설패립토의 역학적 특성 및 물리적 특성

항목	단위중량 (kN/m ³)	비중	액성한계 (%)	소성지수 (%)	압축지수	투수계수 (cm/sec)	비배수강도 (kPa)
범위	15.1~18.0	2.67~2.73	43~120	49~85	0.7~1.37	(1.1~8.5)×10 ⁻⁷	3.0 ~ 23.0

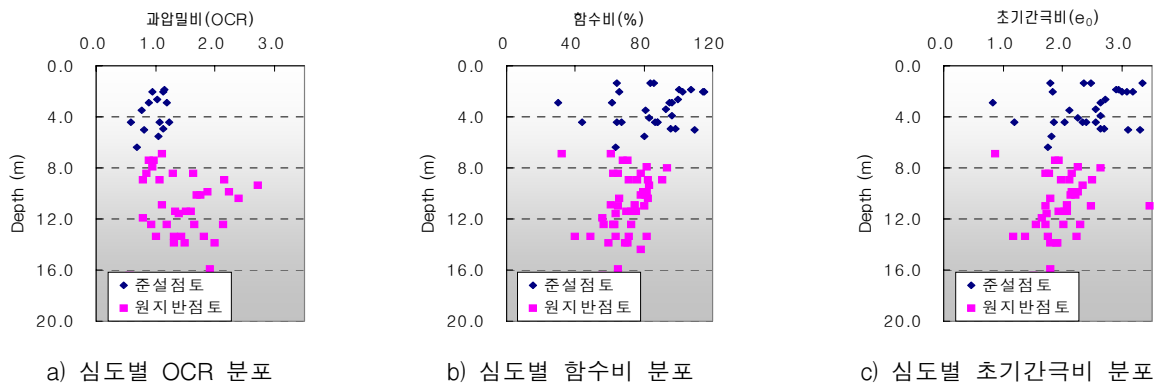


그림 3. 심도별 물리적 특성(광양지역)

3.3 시험방법 및 시험조건

본 연구에서는 준설매립지 내에서 성토하중에 따른 재하-제하시 점토의 2차 압밀거동 특성을 알아보기 위해 단계재하 압밀시험과 surcharging 압밀시험을 수행하였다. 각 시험에 대해 하중조건 및 특징을 요약·정리하면 표 3과 같다.

1) IL_{24} 시험 : 표준압밀시험을 의미한다. 각 하중단계별로 24시간 동안 재하하며, 압밀곡선은 2차 압밀거동도 포함하고 있으므로 이 시험으로부터 얻은 $e-\log t$ 곡선에서 직선구간의 기울기로 2차 압축지수(C_a)를 구할 수 있다.

2) IL_{EOP} 시험 : 각 단계의 압밀하중을 간극수압 소산직후에 재하하므로 표준압밀시험과는 차이가 있으며 시간이 적게 소요되는 특징이 있다. 그러나 과잉간극수압의 소산여부를 측정하는 것이 주된 목적이며, 측정된 과잉간극수압이 1 kPa 이하이면 과잉간극수압이 소산된 것으로 간주한다(이우진 등, 1999). 이 시험으로부터 1차 압축지수(C_c)를 구할 수 있다.

3) SL_{EOP} 시험 : Surcharging 압밀시험을 의미한다. 시험장치는 단계재하 압밀시험 장치와 동일하나 상재하중비에 따라 하중을 제거하여 시간에 따른 1차 리바운드, 2차 리바운드 및 2차 압밀량 변화추이를 매 분당 기록하여 Mesri와 Feng(1991)이 제시한 그래프를 작도

표 3. 시험방법 및 시험조건 요약

시험 번호	종류	심도(m)	하중단계(kPa)	비 고		
단계 재하 압밀 시험	(IE2.0) _w	IL_{EOP}	2.0	10 - 20 - 40 - 80 - 160 - 320	인천지역 교란시료 이용	
	(IE6.0) _w	IL_{EOP}	6.0	10 - 20 - 40 - 80 - 160 - 320		
	(IE10.0) _w	IL_{EOP}	10.0	10 - 20 - 40 - 80 - 160 - 320		
	(IL2.0) _w	IL_{24}	2.0	10 - 20 - 40 - 80 - 160 - 320 - 640 - 1280	인천지역 불교란시료 이용	
	(IL6.0) _w	IL_{24}	6.0	10 - 20 - 40 - 80 - 160 - 320 - 640 - 1280		
	(IL10.0) _w	IL_{24}	10.0	10 - 20 - 40 - 80 - 160 - 320 - 640 - 1280		
	(IE2.0) _s	IL_{EOP}	2.0	10 - 20 - 40 - 80 - 160 - 320	광양지역 교란시료 이용	
	(IE6.0) _s	IL_{EOP}	6.0	10 - 20 - 40 - 80 - 160 - 320		
	(IE10.0) _s	IL_{EOP}	10.0	10 - 20 - 40 - 80 - 160 - 320		
	(IL3.0) _s	IL_{24}	3.0	10 - 20 - 40 - 80 - 160 - 320 - 640 - 1280	광양지역 불교란시료 이용	
	(IL5.0) _s	IL_{24}	5.0	10 - 20 - 40 - 80 - 160 - 320 - 640 - 1280		
	(IL13.0) _s	IL_{24}	13.0	10 - 20 - 40 - 80 - 160 - 320 - 640 - 1280		
(IL2.0) _s	IL_{24}	2.0	10 - 20 - 40 - 80 - 160 - 320 - 640 - 1280	광양지역 교란시료 이용		
(IL6.0) _s	IL_{24}	6.0	10 - 20 - 40 - 80 - 160 - 320 - 640 - 1280			
(IL10.0) _s	IL_{24}	10.0	10 - 20 - 40 - 80 - 160 - 320 - 640 - 1280			
surcharging 압밀시험	(SL 0.3) _w	SL_{EOP}	6.0	10 - 20 - 40 - 80 - 160 - 320 - 416 - 320	$R'_s = 0.3$	인천지역 불교란시료 이용
	(SL 0.5) _w	SL_{EOP}	6.0	10 - 20 - 40 - 80 - 160 - 320 - 480 - 320	$R'_s = 0.5$	
	(SL 1.0) _w	SL_{EOP}	6.0	10 - 20 - 40 - 80 - 160 - 320 - 640 - 320	$R'_s = 1.0$	
	(SL 0.3) _s	SL_{EOP}	6.0	10 - 20 - 40 - 80 - 160 - 320 - 416 - 320	$R'_s = 0.3$	광양지역 불교란시료 이용
	(SL 0.5) _s	SL_{EOP}	6.0	10 - 20 - 40 - 80 - 160 - 320 - 480 - 320	$R'_s = 0.5$	
	(SL 1.0) _s	SL_{EOP}	6.0	10 - 20 - 40 - 80 - 160 - 320 - 640 - 320	$R'_s = 1.0$	

한다. 이 시험으로부터 할선 2차 압축지수(C''_{α})를 구할 수 있다.

침하량을 광역적으로 예측하기 위한 기법을 제안하였다. 본 연구에서 적용한 GIS 기법에 대한 개요도는 그림 4와 같다.

4. GIS 기법

4.1 GIS 기법의 적용 개요

GIS란 공간상 위치를 점유하는 지리자료(geographic data)와 이에 관련된 속성자료(attribute data)를 통합하여 처리하는 정보시스템으로써, 다양한 형태의 지리 정보를 효율적으로 수집, 저장, 갱신, 처리, 분석, 출력하기 위해 이용되는 하드웨어, 소프트웨어, 지리자료, 인적자원의 총체적 조직체라고 정의할 수 있다. 본 연구에서는 서해안 인천지역 및 남해안 광양항 지역의 속성자료 및 위치자료 등을 GIS 기법과 연계하여 대규모 매립지역의 2차 압밀

4.2 속성자료의 데이터베이스화

수치지도로부터 얻은 위치자료와 더불어 대상부지(영종도 인천국제공항 부지, 광양항 동측 배후부지)에 대해 기실시한 실내압밀시험 결과를 수집하여 연약층의 초기간극비, 선행압밀하중, 지반고, 선행재하공법 적용높이 및 연약층의 두께(그림 5 참조) 등과 같은 속성자료들을 데이터베이스화 하였다. 아울러, 본 연구에서 수행한 단계재하 압밀시험 및 surcharging 압밀시험으로부터 얻은 1차압축지수 및 2차압축지수 등의 속성자료를 재데이터베이스화하여 2차압밀 침하량 예측에 사용하였다.

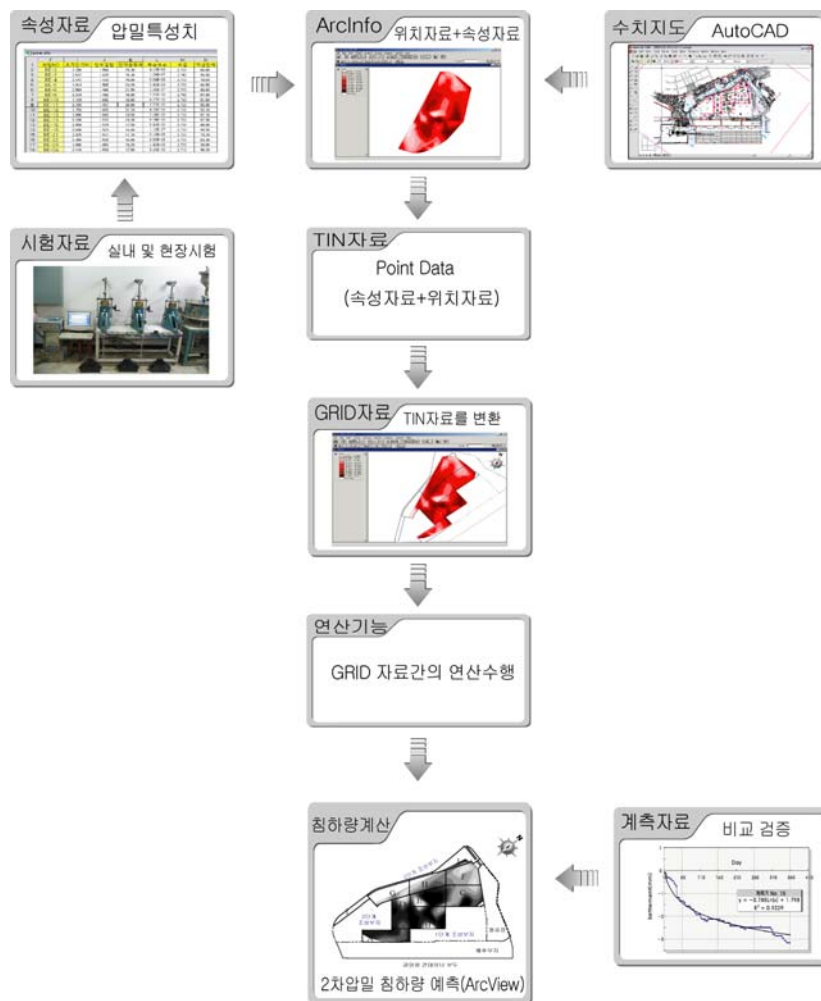
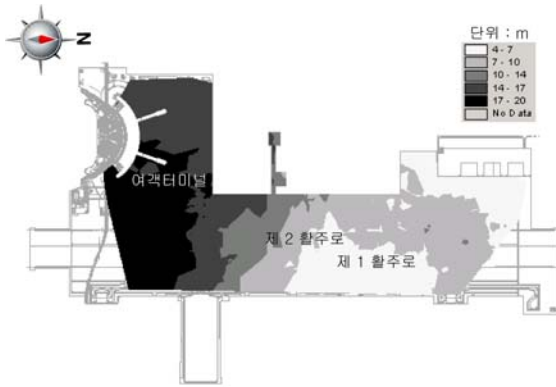
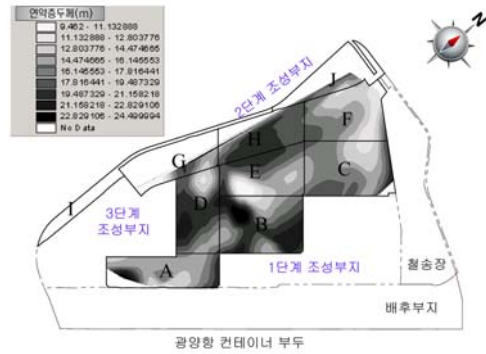


그림 4. GIS 적용 개요도



(a)인천지역



(b)광양지역

그림 5. 연약점토층의 두께 분포도(속성자료)

4.3 위치자료의 생성

속성자료 중 실내시험 및 현장시험 값(초기간극비, 연약층 두께, 선행압밀하중)과 침하계측자료의 입력을 위해 각 계측점과 시추공 위치에 대한 좌표값을 입력하여 포인트 커버리지(point coverage)를 생성하였다. 대상지역인 영종도 인천국제공항과 광양항 동측배후부지의 수치지도(CAD)를 공간 데이터베이스로 구축한 후 일반적으로 사용되는 UTM 도법과 Bessel 타원체를 사용하였다.

4.4 데이터베이스의 변환 및 연산

앞서 언급한 속성자료 및 위치자료를 스프레드시트로 저장한 후, 이를 Arc/Info 7.1 프로그램에서 구동 가능하도록 데이터베이스 파일(dbf)로 변환하여 사용하였다. Arc/Info 7.1 프로그램을 이용하여 각 속성자료 별로 구성된 자료를 토대로 TIN을 작성하고, 이를 그리드(grid)로 변환시키는 절차를 거치는데, 이때 각 그리드 간에 관계를 일정한 함수식으로 지정해주면 새로운 그리드가 연산되어 생성된다. 본 연구에서는 이러한 속성자료들을 데이터베이스화 한 후, 그리드 간의 연산기능을 이용하여 2차 압밀침하량을 예측하였다.

5. 분석 및 고찰

본 연구에서 서해안과 남해안 일대 대규모 매립지역의 장기침하량을 예측하기 위하여 수행한 분석

내용을 요약하면 다음과 같다.

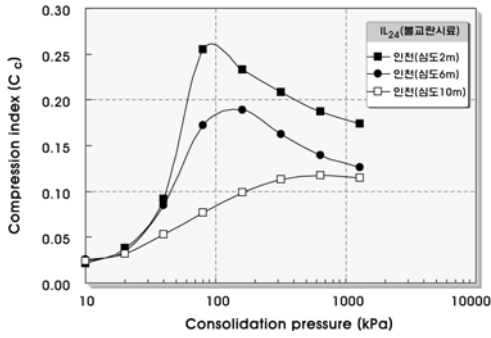
- (1) 실내압밀시험 결과분석 및 활선 2차 압축지수 (C''_a)의 예측(5.1절 참조)
- (2) GIS 분석기법과 활선 2차 압축지수를 이용한 2차 압밀침하량의 광역적 예측(5.2절 참조)
- (3) 현장계측결과의 분석을 통한 비교·검증(5.3절 참조)

5.1 실내압밀시험결과 분석

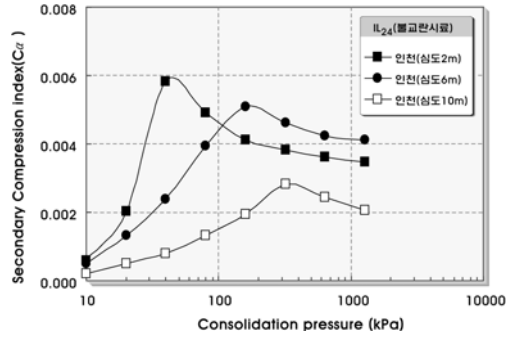
5.1.1 단계재하 압밀시험 결과

5.1.1.1 압밀하중에 따른 C_c 와 C_a

그림 6~그림 8에는 압밀하중에 따른 C_c 와 C_a 의 변화가 도시되어 있다. 압밀하중을 log축 상에 도시하기 위해 SI 단위계(kPa)를 사용하였다. 각 시험에 있어서 압밀하중에 따른 각 지수의 거동을 살펴보면 초반에는 일정한 값을 보이다가 서서히 증가하며 선행압밀하중 부근에서는 주춤했다가 이후 평형을 이룬다. 또한, 동일한 시료에 대해서 두 지수의 분포가 압밀하중에 따라 유사한 경향을 나타내는데, 이는 주종진 등(2002)의 연구내용과도 일치하는 결과이다.

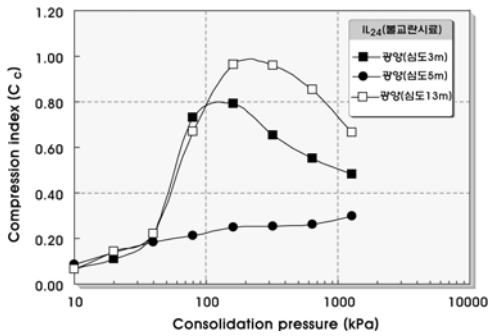


(a) 압밀하중- C_c

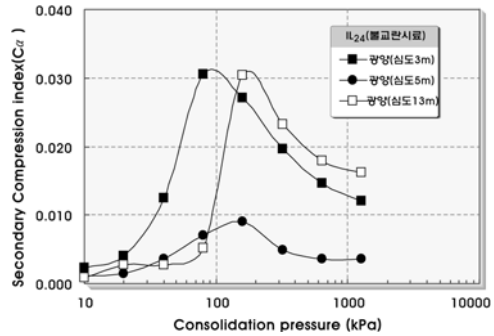


(b) 압밀하중- C_a

그림 6. 압밀하중에 따른 C_c 및 C_a (인천공항 불교란시료)

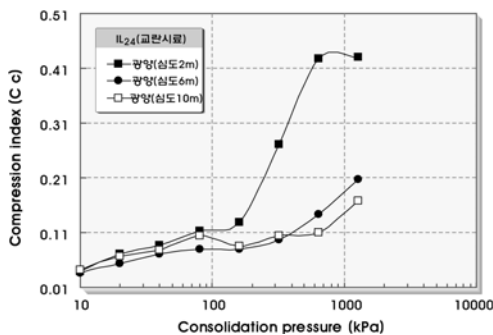


(a) 압밀하중- C_c

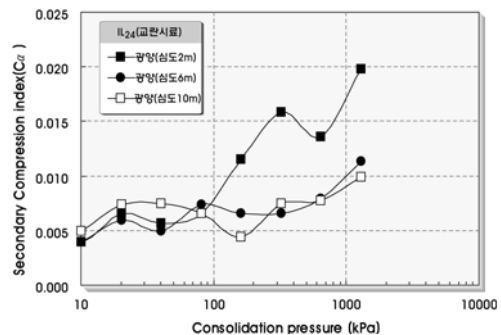


(b) 압밀하중- C_a

그림 7. 압밀하중에 따른 C_c 및 C_a (광양항 동측배후부지 불교란시료)



(a) 압밀하중- C_c



(b) 압밀하중- C_a

그림 8. 압밀하중에 따른 C_c 및 C_a (광양항 동측배후부지 교란시료)

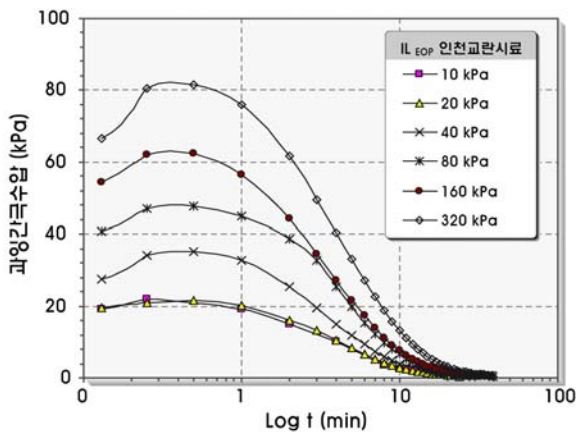
전반적인 압축성은 광양지역의 점토가 인천지역에 비해 2.5~3.8배 정도 큰 것으로 나타났는데, 이

는 점토를 구성하는 성분, 조성광물, 퇴적환경이 서로 상이하기 때문이며 광양지역이 고소성, 고압

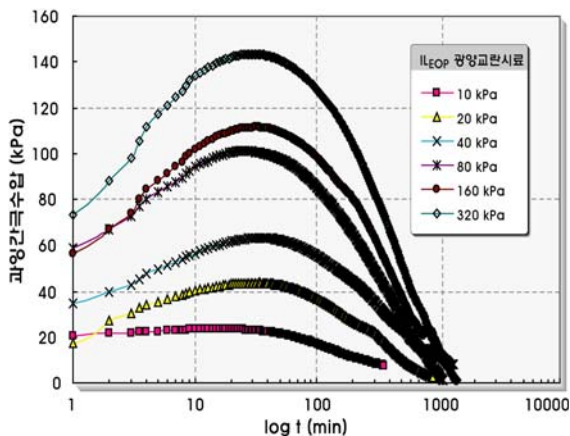
축성의 특성이 더 강한 것으로 판단된다. 한편, 광양지역의 교란시료와 불교란시료에 대한 압축특성을 비교해보면, 교란시료의 경우 재성형과정에서 인위적인 압밀하중을 가하기 때문에 원래의 압축성보다 작은 값들이 형성되며, 선행압밀하중 부근의 감소경향도 뚜렷하지 않은 것으로 나타났다.

5.1.1.2 시간에 따른 과잉간극수압 소산 양상

그림 9에는 서해안과 남해안 지역의 교란시료를 대상으로 IL_{EOP} 시험을 수행한 결과이며, 시간에 따른 과잉간극수압 소산경향이 나타나 있다. 인천지역과 광양지역 점토의 과잉간극수압 소산속도를 비교해보면, 인천지역의 점토(ML, CL)에는 실트질 성분이 많고 광양지역의 점토(CH)에 비해 투수계수도 크므로 소산속도 또한 매우 빠른 것으로 나타났다. 과잉간극수압의 소산시점을 1 kPa 정도로



(a) 인천지역



(b) 광양지역

그림 9. 시간에 따른 과잉간극수압 소산양상(심도 10m)

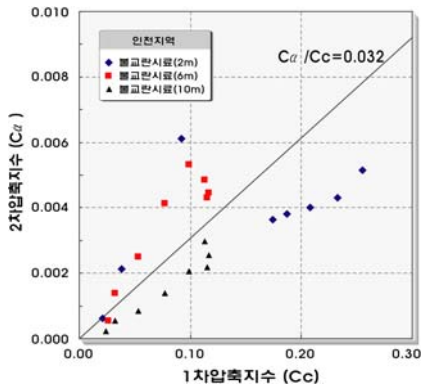
간주하면(이우진, 1999), 압밀도 95%에 이르는 시간은 인천지역이 훨씬 빠름을 간접적으로 알 수 있다.

한편, 속도 뿐만아니라 과잉간극수압의 크기면에서도 두 지역간에 차이가 나타나는데, 인천지역은 추가하중의 약 55%, 광양항 지역은 약 63% 정도의 과잉간극수압이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 압밀이 과잉간극수압의 단순한 소멸과정이 아니라 배수에 의한 소산(dissipation)과 점소성 변형에 의한 생성(generation)의 복합적인 과정이기 때문이다. 이러한 과잉간극수압은 심도가 깊어질수록 크기는 증가하는 경향을 나타낸다. 1차원 압밀이론에서는 하중제하시 발생하는 과잉간극수압은 가해진 하중 증분만큼 즉시 발생한다고 정의하나, Crawford(1965)는 실내압밀시험시 가해진 하중의 80~85%의 과잉간극수압이 발생한다고 보고하고, 그 이유로는 시료내 존재하는 gas와 시료와 압밀링의 벽면 마찰에 기인한다고 설명하였다.

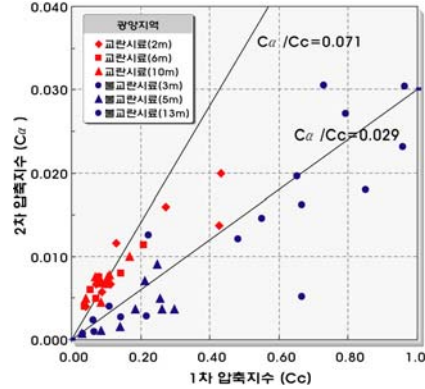
5.1.1.3 압축지수비

일련의 실험(IL_{24} , IL_{EOP})을 통해 각 하중단계별 1차 압축지수와 2차 압축지수와 관계를 도시한 결과는 그림 10과 같다. 그림 10에 나타난 C_a / C_c 는 인천지역이 0.032, 광양지역이 0.029 정도로 나타났으며, 이는 Mesri와 Castro(1987)가 제안한 값(유기질 점토 0.05 ± 0.01 , 무기질 점토 0.04 ± 0.01)의 범위와 유사한 결과이다. 그러나, 광양항 지역의 교란시료를 대상으로 얻은 실험결과 ($C_a / C_c = 0.071$, 그림 10-b 참조)는 Mesri와 Castro(1987)가 제안한 값의 범위를 초과하며, 실제로 실험실에서 수행되는 시험은 재성형시료를 가지고 하는 경우가 많기 때문에 이를 이용하여 장기압밀침하량을 산정하는 경우 주의를 요한다. 즉, 재성형은 일반적으로 2차 압밀속도를 저하시키고, 재성형 시료보다 불교란시료에서 더 큰 2차 압밀특성을 나타낸다는 연구결과(Keene, 1964)와도 부합되는 내용이다.

따라서, 본 연구에서는 GIS를 이용한 장기압밀침하량 분석시, 불교란 시료를 대상으로 하여 얻은 실험결과를 사용하였다.

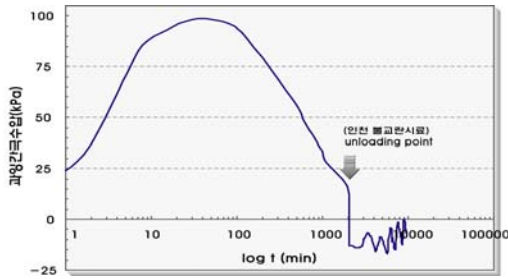


(a) 인천지역

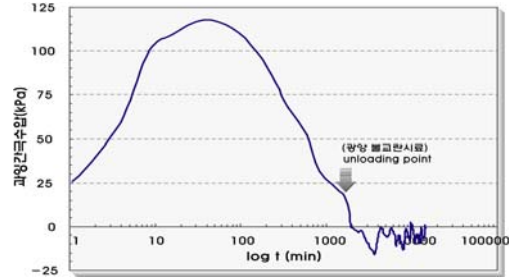


(b) 광양지역

그림 10. 서해안과 남해안 점토의 압축지수비 (C_a / C_c)

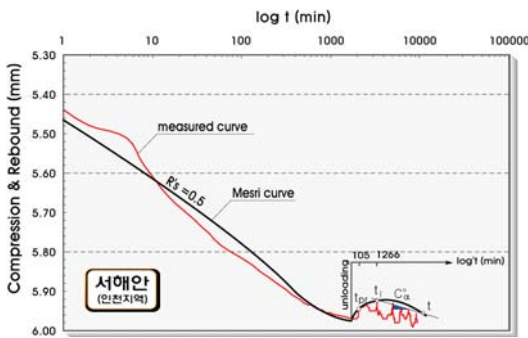


(a) 인천지역

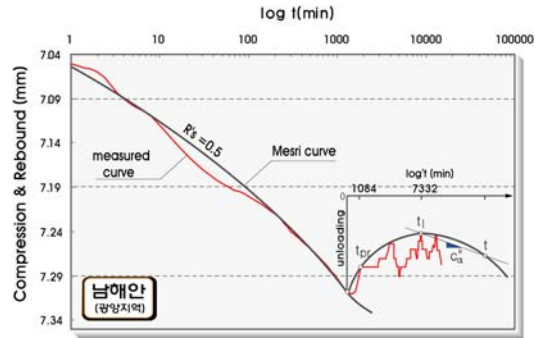


(b) 광양지역

그림 11. 시간에 따른 과잉간극수압 소산양상 ($R_s' = 0.5$)



(a) 인천지역



(b) 광양지역

그림 12. 시간에 따른 침하-팽창 곡선 ($R_s = 0.5$)

5.1.2 Surcharging 압밀시험결과

5.1.2.1 시간에 따른 과잉간극수압 소산 양상

그림 11은 서해안 및 남해안 지역에서 채취한 불교란시료(심도 6m)를 대상으로 SL_{EOP} 시험을 수행한 결과이며, 시간에 따라 과잉간극수압이 소산되다가 하중을 제거하게 되면 부(-)의 간극수압이 발생되는 것을 확인할 수 있다. 하중제거에 의해

발생한 부의 간극수압은 시간이 지나면 소멸되는데, 파형을 그리며 '0'에 수렴하는 양상을 보인다.

5.1.2.2 시간에 따른 침하-팽창 곡선

그림 12는 IL_{EOP} 시험조건으로 수행한 시간-침하(팽창) 관계곡선이며, 압밀하중을 최종하중(320 kPa) 단계까지 가한 후, 상재하중비 R_s' 값을 변화시켜가면서 과잉간극수압 90% 소산시점에서 상재하

중을 제거하고 하중제거에 의한 1차 팽창, 2차 팽창 및 2차 압축량을 기록한 결과이다.

그림 12를 살펴보면, 두 지역의 리바운드량 및 시간은 현격한 차이를 보이는데, 이는 고소성, 고압축성의 준설점토일수록 보다 많은 리바운드량이 발생하며 소요시간 또한 긴 특징을 나타낸다. 따라서, 유기질 성분이 적고 실트질 성분이 많은 인천지역의 준설점토는 광양지역에 비해 리바운드 및 재압축이 조기에 종료되는 특징을 보인다. 상기의 그림 12와 표 4 등을 토대로 인천과 광양지역의 t_l / t_{pr} 을 각각 구할 수 있으며, t_l 을 기점으로 임의의 시간 t 까지 직선을 그어 기울기를 산정함으로써 할선 2차압축지수 C''_a 를 구할 수 있다.

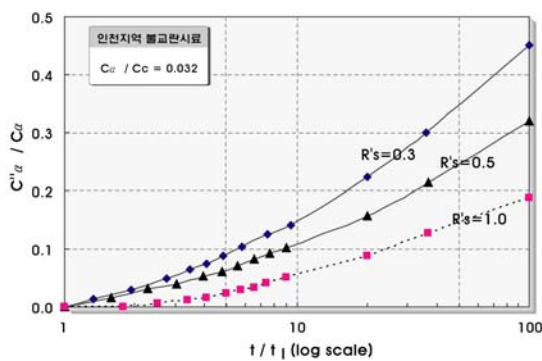
5.1.2.3 C''_a / C_a 와 t / t_l 의 관계

과잉간극수압의 90% 소산여부를 확인하고 하중을 제거한 후, 팽창여부를 점검하면서 2차압밀이 나타나는 시점(t_l)을 기준으로 C''_a / C_a 와 t / t_l 의 관계를 도시하면 그림 13과 같다.

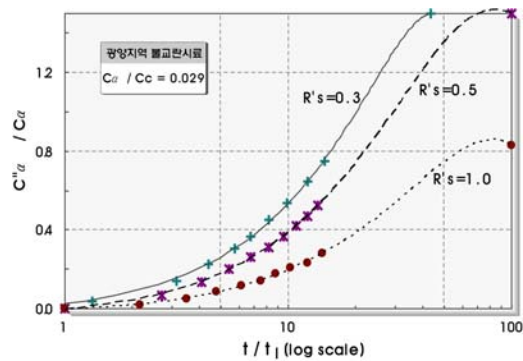
그림 13은 Mesri와 Feng(1991)이 제시한 그래프와 동일한 경향을 보이며, 이 그래프에서 각 곡선에 대한 회귀곡선식(표 5 참조)을 구하면 임의의 시간 t 시점에서의 2차 압밀정수(C''_a / C_a)를 얻을 수 있다.

표 4. 상재하중비에 따른 t_l / t_{pr}

구분	인천지역 준설점토			광양지역 준설점토		
	t_{pr} (min)	t_l (min)	t_l / t_{pr}	t_{pr} (min)	t_l (min)	t_l / t_{pr}
R's = 0.3	371	1583	4.27	3800	12176	3.20
R's = 0.5	105	1266	12.02	1084	7332	6.76
R's = 1.0	30	1004	33.88	240	5814	24.23



(a) 인천지역



(b) 광양지역

그림 13. $C''_a / C_a - t / t_l$ 관계

표 5. $C''_a / C_a - t / t_l$ 관계 회귀곡선식(3차 다항식)

구분	인천지역				광양지역			
	회귀곡선식($y = ax^3 + bx^2 + cx + d$)				회귀곡선식($y = ax^3 + bx^2 + cx + d$)			
	a	b	c	d	a	b	c	d
R's=0.3	$2.0e^{-6}$	-0.0003	0.0164	0.0050	$-4.0e^{-6}$	$-4.0e^{-4}$	0.0620	-0.0359
R's=0.5	$1.0e^{-6}$	-0.0002	0.0127	0.0127	$2.0e^{-6}$	$-5.0e^{-4}$	0.0488	-0.0552
R's=1.0	$8.0e^{-7}$	-0.0001	0.0075	-0.0103	$4.0e^{-7}$	$-2.0e^{-4}$	0.0245	-0.0298

5.1.2.4 t_i / t_{pr} 과 상재하중비의 관계

인천지역과 광양항 지역에 존재하는 준설향토를 대상으로 실험을 수행한 후, t_i / t_{pr} , $R's$ 값을 좌표상에 표시하면 그림 14와 같다. 광양지역의 일부 데이터는 Mesri와 Feng(1991)이 실험으로부터 얻은 결과의 범위와 다소 상이하지만 대체적으로 오차범위내에 존재하는 것으로 간주할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 Mesri와 Feng(1991)이 제시한 경험적인 회귀곡선식($t_i / t_{pr} = 100 R'_s{}^{1.7}$)을 이용하였으며, 임의의 상재하중비에서의 t_i / t_{pr} 값을 산정하여 이를 GIS 분석시 기초자료로 활용하였다.

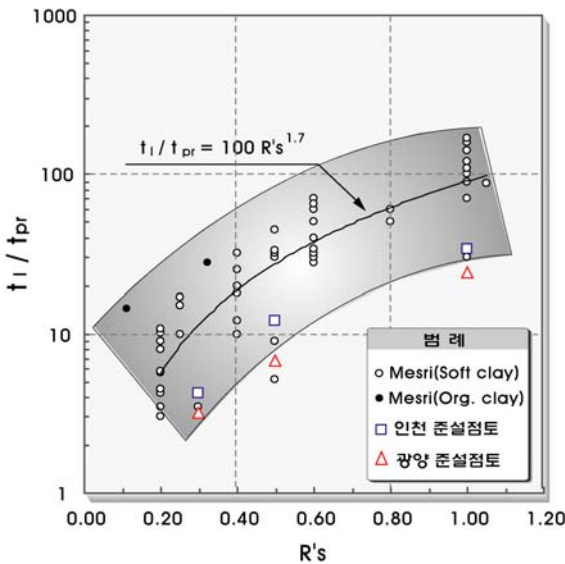


그림 14. R'_s 에 대한 t_i / t_{pr} 의 경험적인 관계

5.2 GIS 기법에 의한 장기침하량의 광역적 예측

5.2.1 예측방법 및 개요

영종도 인천국제공항 부지나 광양항 동측배후부지와 같이 제한된 지반조사와 실내시험결과를 토대로 압밀침하량을 산정하여, 대상지역 전체의 압밀침하 거동을 파악하기란 매우 어려운 일이다. 그러나, GIS기법과 실내시험결과를 이용한 각 지역의 압밀특성치와 공간추정치 들을 결합한다면, 대규모 매립지역의 장기침하량(2차 압밀침하량)에

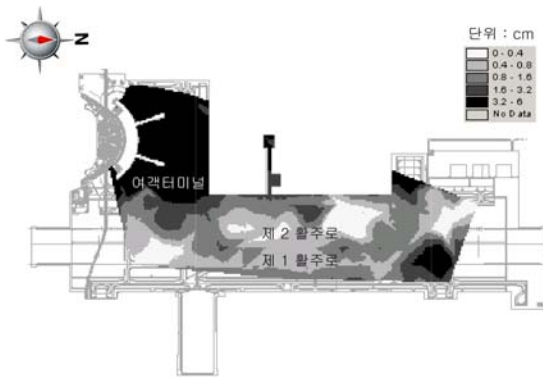
대한 보다 효율적인 검토가 수행될 수 있다. 다만, 광범위한 지역내 존재하지 않는 일부 데이터 들을 보간할 경우에는, GIS의 공간추정 기능을 활용하여 미지의 값을 추정하여야 한다. 본 연구에서는 Lee 등(2004)의 연구결과를 참조하여 보간에 대한 신뢰성이 우수한 크리깅 기법을 이용하여 임의의 지점에 대한 미지의 값을 추정하였으며, 이를 이용하여 광범위한 지역의 2차 압밀침하량을 예측하였다.

5.2.2 2차 압밀침하량 예측

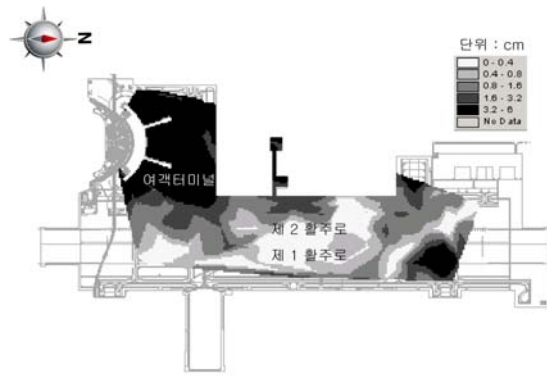
선행하중 제거 이후에 나타나는 활선 2차압축지수를 사용하여 인천지역의 2차 압밀침하량을 예측하였다. 공간추정기법(역거리내삽법 및 크리깅 기법)을 사용하였으며 30년후의 장래 침하량을 도시하였다. 그림 15 및 16을 살펴보면, 크리깅 기법을 사용할 경우나 역거리 내삽법을 사용할 경우 모두, 2차 압밀침하의 크기 및 최대침하의 발생위치 면에서 대체로 유사한 경향을 보인다. 그러나 전체적인 침하분포는 크리깅 기법을 사용하는 경우가 실제 분포양상에 근접하는 것으로 판단된다.

인천국제공항 지역의 준설향 매립지반은 지역에 따라 2차 압축지수가 편차가 크지 않으므로 2차 압밀침하를 지배하는 요인은 연약층의 두께로 판단되며, 연약층의 두께가 20m 이상으로 나타난 여객터미널 부근에서 상대적으로 많은 양의 2차 압밀침하량이 발생한 것으로 추정된다. 그러나, 연약층의 두께에 비해 2차 압밀침하량이 적게 예상되는 원인은 선행재하공법을 사용하여 2차 압밀침하량을 감소시킨 효과와 더불어, 인천지역 준설향 매립지반이 실트 섞인 점토층이 대부분이고 투수성도 크기 때문에 그 발생량이 적은 것으로 사료된다.

광양항 동측배후단지 지역의 준설향 매립지반은 2차 압축지수의 지역적 편차가 심하고 준설향토의 투기연한이 오래되지 않은 초연약지반에 해당한다. 연약층의 두께에 비례하여 2차 압밀침하량이 크게 발생하는 원인은 살펴보면, illite 계통의 고소성 점토광물로 구성된 층이 주를 이루고 있고 준설향 투기연한이 5년 미만인 지역이 다수 분포되어 있기 때문에 인천지역(실트 섞인 점토층)에 비해 상대적으로 많은 양의 2차 압밀침하가 발생한 것으로 추정된다. 이러한 2차 압밀침하량을 효과적으로 저감시키기 위해서는 선행재하공법의 재하기간 동안 현장에서 과잉간극수압 소산여부와 압밀도

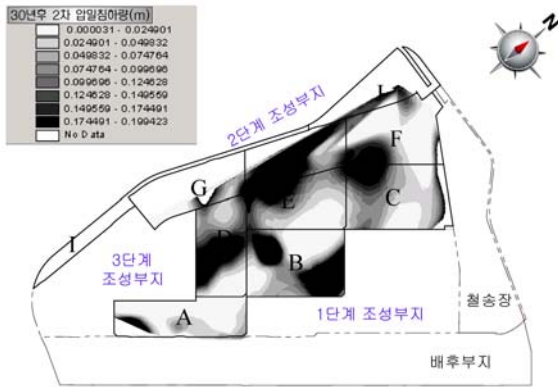


(a) 크리깅 기법 적용

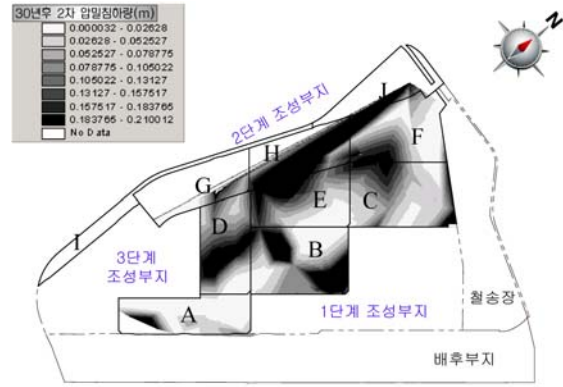


(b) 역거리 내삽법 적용

그림 15. 30년후 2차 압밀침하량(인천지역)



(a) 크리깅 기법 적용



(b) 역거리 내삽법 적용

그림 16. 30년후 2차 압밀침하량(광양지역)

등을 주기적으로 관찰하고 성토하중 제거기간 및 제거시점등을 합리적으로 결정하여야 한다. 즉, 소정의 압밀도(95%)에 다르지 않은 상태에서 성토하중을 제거한다면, 제거시점부터 장기간에 걸쳐 지속적으로 발생할 수 있는 2차 압밀침하량으로 인해 부지계획고 조성에 차질이 생길 뿐만 아니라 추가적인 공사비 부담도 증가하게 된다.

5.3 장기침하량 예측치와의 비교 검증

그림 17에서는 인천국제공항 지역에서 현재까지 수집된 장기계측치를 GIS 기법(크리깅 기법 및 역거리내삽법)에 의한 예측결과와 비교해 보았다. 인천국제공항의 계측기는 선행하중 제거시기(1999년 10월)에 철거되었으나, 이후 포장공사를 실시하면서

15개의 계측기를 추가로 재설치하였다. 압밀도 90%에 도달했을 때 선행하중을 제거했으므로 선행하중 제거후 100여일 경과시점(2000년 1월)에 재설치된 계측기로부터 수집된 자료를 2차압밀에 대한 예측치로 간주하였다. 1차 계측 종료시점부터의 예측결과(2차 압밀침하량)를 살펴보면 2차 압밀침하량 대부분이 5mm 내외에서 발생하고 있으며, GIS를 이용한 침하예측결과와도 유사한 분포양상을 갖는다.

그림 18은 인천지역 15개 계측지점의 장기계측치를 토대로 회귀곡선법, 쌍곡선법 및 Hoshino 방법을 이용하여 30년후의 침하량을 예측한 것이며, GIS 기법(본 연구기법)에 의한 장래침하량 예측치도 함께 도시하였다. 분석결과, 현장계측치로 장래의 침하량을 추정하는 여러 방법들중 쌍곡선법이 본 연구기법과 가장 유사한 것으로 나타났다.

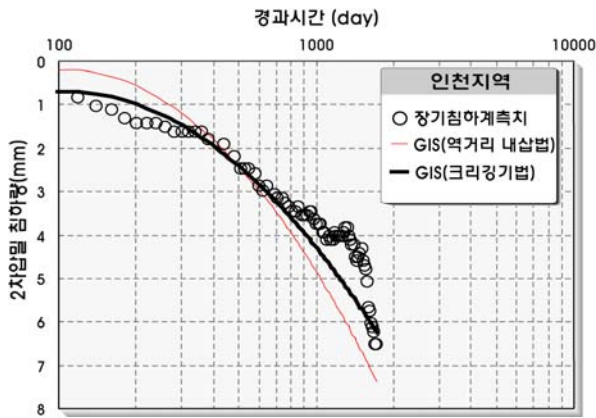


그림 17. 2차 압밀침하량 비교(계측기 No.12)

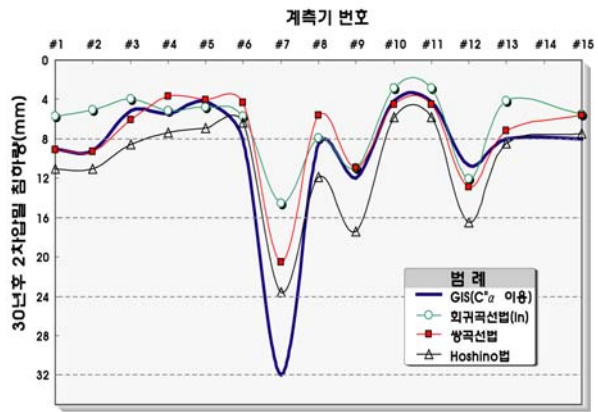


그림 18. 30년후의 2차압밀침하량 예측(인천지역)

6. 결론

본 연구에서 얻은 결론을 2차 압밀침하량 예측 순서에 맞추어 요약·정리하면 다음과 같다.

- (1) 단계재하 압밀시험으로부터 압축지수비 (C_a / C_c)를 산정한 결과, 인천지역이 0.032, 광양지역이 0.029 정도로 나타났으며, 이는 Mesri와 Castro(1987)가 제안한 값의 범위와 유사한 결과이다.
- (2) Surcharging 압밀시험은 선행재하공법에서 상재하중 제거후의 거동 지표인 할선 2차 압축지수 (C''_a)를 규명하기 위해 수행되었으며, 상재하중 제거에 따른 팽창과 재압축량을 기록함으로써 Mesri와 Feng(1991)이 제시한 C''_a / C_a 및 t / t_l 의 관계를 얻을 수 있었다.
- (3) 서해안과 남해안 일대의 대표적인 준설패립지반을 대상으로 얻은 실내압밀시험결과를 D/B화 한 후, GIS 기법을 접목하여 광범위한 지역의 2차 압밀침하량을 예측하였다.
- (4) 제한된 지반조사결과와 실내시험결과를 토대로 2차 압밀침하량을 산정할 경우, 각 데이

터간에 상관관계를 조사하여 보간을 실시하는데, GIS의 공간추정 기법중 역거리 내삽법 보다는 크리깅 기법이 보다 실제에 가까운 침하분포양상을 나타내었다. 아울러, 현장계측치로 장래의 침하량을 추정하는 여러 방법들중 쌍곡선법이 본 연구기법과 가장 유사한 것으로 나타났다.

- (5) 한편, 인천지역과 광양지역의 2차 압밀침하량의 지역적 편차는 상당히 큰 것으로 확인되었는데, 광양지역의 준설패립지반은 illite 계통의 고소성 점토광물로 구성된 층이 주를 이루고 있고 준설패립기년한이 5년 미만이므로 인천지역(실트 섞인 점토층)에 비해 상대적으로 많은 양의 2차 압밀침하가 발생한 것으로 추정된다.

상기의 분석내용을 종합해 본 결과, 장기계측치와 본 연구 제시기법의 결과치가 유사한 양상을 보임에 따라 할선 2차 압축지수 및 GIS 기법의 적용가능성을 확인하였다. 따라서, 실내실험 및 현장시험 등 한정된 지반조사 정보를 적극적으로 D/B화 하고 이를 GIS 기법과 연계하여 활용해 나간다면 향후 대규모 패립지역의 침하관리나 유지보수 관리에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

(접수일 : 2005. 6. 10. 심사완료일 : 2005. 7. 22.)

참고문헌

1. 김윤태(2005), 배수제가 설치된 연약지반의 2차압축을 고려한 축대칭 비선형 압밀해석. 한국지반공학회논문집, 제21권, 제3호, pp. 133~140.

2. 김진홍(2000), GIS기법을 이용한 대규모 매립지역의 장기 침하예측. 홍익대학교, 박사학위논문.
3. 동아건설터트(1996), 수도권 신공항 부지조성공사 5-1 공구 계측관리 종합보고서. 인천국제공항공사.
4. 이우진, 김규선, 임형덕(1999), 실내압밀시험에 의한 남해한 해상점토의 C_a / C_c . 한국지반공학회논문집, 제15권.제6호, p. 87~98.
5. 주종진, 이우진, 임형덕, 김대규, 김낙경, 김형주(2002), 군산점토의 2차압밀 감소를 위한 Surcharging 평가. 한국지반공학회논문집, 제18권. 제4호, p. 127~135.
6. 포스코건설, 에스코건설터트(2005), 광양항 동측배후단지(2단계) 조성공사 대안설계보고서. 해운항만청.
7. 현대건설, 동아건설터트(1996), 수도권 신공항 5-2공구 지역 지반조사 보고서. 신공항건설공단.
8. Crawford, C.B.(1965). The resistance of soil structure to consolidation. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 2(2), pp. 90~97.
9. Keene, P.(1964), Discussion of Design of Foundation for Control of Settlement. Proc., ASCE, Evanston Ill, pp. 357~358.
10. Lee, H.J., Park, S.W., Yoo, S.D. & Kim, H.T.(2004), An Estimation of Long-term Settlements in the Large Reclamation Site and Determination of Additional Sampling Positions Using Geostatistics and GIS. Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 20, No. 2, pp. 131~141.
11. Ladd, C.C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F. & Poulos, H.J. (1977). Stress-deformation and strength characteristics. Proc. 9th ICSMFE, Tokyo, pp. 421~494.
12. Mesri, G. and Castro, A.(1987), The C_a/C_c Concept and K_0 During Secondary Compression. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 113, No. GT3, Mar. 1987, pp. 230~247.
13. Mesri, G. and Choi, Y. K.(1985), Settlement Analysis of Embankments on Soft Clays. Journal of the Geotechnical Engineering Division. ASCE, Vol. 111, No. GT4, Apr. 1985, pp. 441~464.
14. Mesri, G. and Feng, T. W.(1991), Surcharging to Reduce Secondary Compression. Journal of Geotechnical Engineering for Coastal Development—Theory to Practice, Yokohama, Vol. 1, pp. 359~364.
15. Mesri, G. and Godlewski, P. M.(1977), Time and Stress Compressibility Interrelationship. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT5, pp. 417~430.