

GIS 기법을 이용한 대규모 매립지반의 장기침하 예측

Prediction of Long-term Settlement in the Big Reclamation Site Using GIS

김 홍 택 ^{*1}	Kim, Hong-Taek	이 혁 진 ^{*2}	Lee, Hyuk-Jin
김 영 웅 ^{*3}	Kim, Young-Ung	김 진 홍 ^{*4}	Kim, Jin-Hong
김 홍 식 ^{*5}	Kim, Hong-Shik		

Abstract

In this study, GIS(Geographic Information System), a new approaching method, is proposed to effectively manage long-term settlements in the big reclamation sites. To verify an applicability of the proposed method, the prediction of long-term settlements which may occur in the overall soft deposits of the Incheon International Airport is carried out. During the process of the prediction of long-term settlements, measured settlement data obtained from an early stage of preloading are analyzed in detail. For purposes of the analysis, an estimation of the recompression index is also made based on the Nagaraj's research results. The coefficient of the secondary consolidation is further determined based on the relationship presented by the Mesri & Godlewski, which defines a ratio between the coefficient of the secondary consolidation and the recompression index.

요 지

본 연구의 주된 목적은 지리정보체계(GIS, Geographic Information System) 기법을 활용하여 대규모매립지반의 장기적인 침하관리를 보다 효율적으로 수행할 수 있는 새로운 접근방법을 제시함에 있으며, 또한 제시된 GIS 기법 등을 활용하여 선행재하공법이 적용된 인천국제공항 부지 전체연약층의 향후 예상침하량을 추정하여 보았다. 이 과정에서 공사 중 및 현재까지 측정된 다양한 침하량 계측자료가 분석되었으며, 아울러 Nagaraj 등의 이론을 토대로 한 재압축 지수의 산정과 Mesri & Godlewski가 제시한 과압밀상태에서의 2차압밀계수-재압축지수 사이의 비를 정의하는 관계식 등을 토대로 2차압밀계수의 결정이 이루어 졌다.

Keywords : GIS, Incheon international airport, Long-term settlement

1. 서 론

최근 들어 우리나라는 대단위 물류기지의 확보 및 물류비용의 감소를 위해 영종도 신공항 및 가덕도 신항만

과 같은 대규모 매립지 조성사업이 늘어가고 있는 추세에 있다. 그러나 이와 같은 대규모 매립지는 대부분 연약지반상에 조성되기 때문에 장기적인 침하관리가 주요한 관심 대상이며, 이를 위해 자동계측 등의 hardware

*1 정회원, 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Dept. of Civil Engrg., Hongik Univ., htaek@wow.hongik.ac.kr)

*2 정회원, 홍익대학교 대학원 토목공학과 석사과정 (Member, Dept. of Civil Engrg., Hongik Univ.)

*3 정회원, 인천국제공항공사 건설시협소 소장 (Member, Research & Analysis office, Incheon International Airport Corp.)

*4 정회원, 한석 엔지니어링 토질부 상무 (Member, Geotechnical Div. Hansuk Eng., Co., Ltd.)

*5 (주) 건설진흥공단 (Construction Management Eng., Corp.)

적인 시스템은 기술적으로 많은 발전이 진행되어 실용화되고 있는 실정이나, 이를 제대로 관리하고 평가할 수 있는 software적인 시스템에 대한 기술이 부족하여 많은 계측자료가 효과적으로 활용되지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는, 지리정보체계(GIS, Geographic Information System) 기법을 활용하여 대규모매립지반의 장기적인 침하관리를 보다 효율적으로 수행할 수 있는 새로운 접근방법을 제시하였다. 또한 제시된 접근방법의 적용성을 확인하기 위해, GIS 기법 등을 활용하여 선행 재하공법이 적용된 인천국제공항 부지 전체연약층의 향후 예상침하량을 추정하여 보았다. 이 과정에서 공사 중 및 현재까지 측정된 다양한 침하량 계측자료가 분석되었으며, 아울러 Nagaraj 등(1985)의 이론을 토대로 한 재압축지수의 산정과 Mesri & Godlewski(1977)가 제시한 과압밀상태에서의 2차압밀계수-재압축지수 사이의 비(ratio)를 정의하는 관계식 등을 토대로 2차압밀계수의 결정이 이루어 졌다.

본 연구에서 활용한 GIS 기법 및 압밀거동 관련이론을 우선 요약·정리하면 다음과 같다.

2. GIS 기법 및 압밀거동 관련이론

2.1 GIS 기법

지리정보체계(이하 GIS)는, 지리적으로 배열된 모든 유형의 정보를 효율적으로 취득하여 저장, 갱신, 관리, 분석 및 출력 등이 가능하도록 조직화된 컴퓨터 하드웨어, 소프트웨어, 지리자료 및 인력 등의 집합체이다. 따라서 GIS는 컴퓨터를 이용하여 어느 지역에 대한 토지, 지리, 환경, 자원, 시설관리, 도시계획, 및 방재 등 제반 공간요소에 연계된 속성정보(attributive information)와 공간정보를 지리적 공간위치에 맞추어 일정한 형태로 수치화하여 입력하고, 그 정보를 사용목적에 따라 관리, 처리 및 분석하여 필요한 결과물을 출력할 수 있는 기능을 갖춘 공간분석에 관한 종합적인 정보관리시스템이라 할 수 있다.

일반적으로 숫자나 문자정보를 처리하는 다른 정보시스템과는 달리, GIS는 공간적으로 배열된 형태의 자료를 처리한다. 공간자료의 집합은 지도자료(cartographic data)와 속성자료로 구성된다. 여기에서 지리자료는 공간좌표체계 또는 시간-공간좌표체계 내에서 위치를 표

현하는 자료를 의미하고, 속성자료는 공간적 개념이 포함되지 않은 자료를 의미한다. 이처럼 공간좌표는 축척, 좌표체계 및 포괄범위 등이 다르고 이질적인 자료원으로 구성된다.

따라서 숫자와 문자정보만을 처리할 수 있는 전통적인 데이터베이스 관리체계를 활용하여 공간자료를 제대로 관리하고 분석하는 것은 불가능하다. 그러나 GIS를 활용하면 각종 수치속성정보를 지도상의 공간적 위치에 대응시켜 관리할 수 있으므로 정보 사이의 공간적 위상관계를 쉽게 정립할 수 있다. 따라서 GIS는 완전한 형태의 정보관리시스템을 구축하는데 필수적이라 할 수 있다. 또한 GIS를 이용하여 여러 가지 주제도(主題圖)를 목적에 따라 자유자재로 중첩하여 분석할 수 있으므로 지도나 도면을 쉽게 작성할 수 있을 뿐만 아니라 새로운 형태의 결합된 속성정보도 손쉽게 생성할 수 있다.

GIS 작업수행 내용을 추가하여 기술하면 다음과 같다(김영표 등, 1999; 최봉문 등, 1999).

2.1.1 공간정보데이터 구축

GIS작업을 수행하기 위하여 먼저 대상을 결정하고 자료를 취득하여 데이터베이스를 구축한다. 계속해서 GIS를 이용하여 데이터베이스 정보를 구축하고 최종으로 분석결과를 표현하는 등 총 4단계의 작업과정을 수행하며, 이를 요약·정리하면 아래와 같다.

(1) 공간자료데이터베이스 구축

공간자료를 입력하는 방법으로 수치정보의 직접입력, 디지털라이징(digitizing), 스캐닝(scanning), 사진측량 및 일반측량, 원격탐사, GPS 등이 있다. 이러한 방법들 중 디지털라이징하는 방법과 스캐닝하는 방법이 가장 일반적으로 사용된다.

한편, 수치지도 생산, 제작 및 판매기관에서 수치화된 공간자료를 구매할 수도 있다. 대표적으로 국립지리원의 수치지형도 전산파일, 미국의 TIGER파일 등이 있으며 이러한 자료는 변환과정을 통해 원하는 형태로 사용할 수 있으므로 시간과 비용을 절약할 수 있다.

(2) 속성자료데이터베이스 구축

공간정보데이터베이스는 공간자료와 속성자료의 결합을 통해 구축될 수 있다. 따라서 공간정보데이터베이스를 구축하기 위해 공간자료데이터베이스와 속성자료데이터베이스를 구축해야 한다. 속성자료데이터베이스

구축절차는 다음과 같다.

먼저 시스템에 대한 장기적인 전략을 수립하고 자료를 개념적으로 모델링한다. 자료의 개념적 모델을 기초로 데이터베이스를 정의하고 시스템과 데이터베이스 사이의 관계를 명확히 한다. 정의된 데이터베이스를 구축하기 위하여 원시 속성자료를 수집하고 데이터베이스 설계과정에서 결정된 항목과 유형에 적합하도록 정리한다. 또한 GIS에 내장된 고유의 데이터베이스 관리 체계나 ORACLE과 같은 DBMS전용 소프트웨어를 이용하여 자료테이블을 작성하고 데이터베이스에 자료를 입력한다. 입력된 자료는 오류검증과정을 거친 후 공간 자료데이터베이스와 연계하여 이용된다.

(3) 공간자료와 속성자료의 연계

공간자료와 속성자료를 연결하기 위해 공간자료 레코드와 속성자료 레코드 사이에 상호 식별가능한 공통항목이 존재한다. 공통항목을 이용하여 공간자료와 속성자료를 조회하거나 통합하여 새로운 정보를 산출할 수 있다.

2.1.2 공간정보 분석

GIS는 지리분석을 수행하여 현실세계를 반영하는 모형을 개발하고 이를 응용하여 현실세계의 모습을 빠르고 명확하게 밝혀낼 수 있다. 또한 모형을 활용하여 지리자료에 대한 추이를 파악하고 새롭게 유용한 정보를 창출한다. 모형을 통해 자료내부 또는 자료 사이에 존재하는 관계를 발견하고 현실세계에 대한 이해를 높일 수 있으며, 이를 보다 상세히 설명하면 아래와 같다.

(1) 공간연산 수행

1) 버퍼 생성

버퍼(buffer) 생성은 지리적 요소를 둘러싸고 있는 면적을 검색하기 위하여 주로 이용되는 공간연산기법의 하나이다. 즉, 지리적 요소를 둘러싸는 폴리곤(polygon)을 버퍼 또는 버퍼영역이라 한다. 버퍼는 하천 주변 30m 이내 지역의 지정 등과 같이 공간적 근접성을 결정하는데 주로 사용된다. 버퍼는 점, 선, 면 등 모든 지리적 요소에 대해 제작될 수 있다.

2) 지리적 요소 조작

커버리지(coverage)를 자르거나 인접한 커버리지를 통합하는 공간자료의 조작과정을 통해, 지리적 요소를

제거하거나 추가할 수 있다. 이러한 조작과정에서 새로운 커버리지가 생성된다. 또한 지리적 요소가 커버리지 경계선의 내부에 존재하면 지리적 요소는 커버리지에 포함되고 외부에 존재하면 포함되지 않는다. 이처럼 기존의 커버리지를 중첩 또는 결합하여 지리적 요소를 제거·대체·삭제·통합할 수 있다.

3) 폴리곤의 중첩

새로운 커버리지를 제작하기 위해 폴리곤 커버리지 위에 다른 폴리곤 커버리지를 중첩시키는 공간연산을 폴리곤의 중첩이라고 한다. 이 때 폴리곤의 공간적 위치와 폴리곤의 속성값들은 새로 제작된 커버리지에서 새로운 관계로 통합된다. 이에 따라 해당 커버리지에 대한 속성테이블들도 결합되어 새로운 속성테이블을 제작하는 것을 알 수 있다. 속성테이블들은 지역코드 또는 지번을 기준으로 결합될 수 있다.

(2) 속성자료의 분석

GIS데이터베이스에 수록된 속성자료는 관련된 공간자료와 연계되어 있다. 따라서 속성항목에 특정값이 주어지면 적합한 공간요소를 검색하는 작업은 어렵지 않다. 일반적으로 사용되는 ARC/INFO의 경우, RESELECT와 ASELECT 등의 명령어가 이러한 기능을 수행한다. 또한 이러한 기능과 함께 자주 사용되는 명령어로 CALCULATE가 있다. 이것은 수식을 이용하여 지정된 항목의 속성값을 계산한 후 그 값을 해당 항목에 할당하는 명령어이다.

지리분석과정에서 공간분석과정과 이러한 기능들을 적절히 조합하여 활용하면 여러 가지 종류의 유용한 속성분석결과를 손쉽게 도출할 수 있다.

2.2 최종침하량 예측방법

쌍곡선 방법은, 침하의 평균속도가 쌍곡선 형태로 감소한다는 가정하에, 초기의 실측 침하량으로부터 장래의 침하량을 예측하는 방법이며(Tan 등, 1991; Tan, 1993), 관계식을 정리하면 식 (1) 및 (2)와 같다.

$$S_t = \frac{t}{\alpha + \beta \cdot t} \quad (1)$$

$$S_t = S_0 + \frac{1}{\beta} \quad (2)$$

여기서, S_t : 성토종료 이후 경과시간 t에서의 침하량
 S_0 : 최종침하량

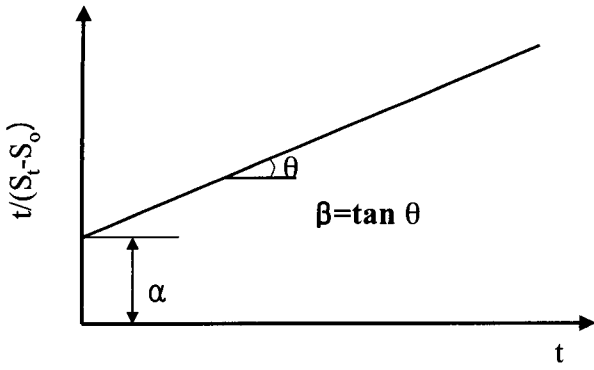


그림 1. 쌍곡선 방법 개요

- S_0 : 성토종료 직후의 즉시침하량
- t : 성토종료 시점으로부터의 경과시간
- α, β : 실측 침하량으로부터 구한 계수

위의 식 (1) 및 (2)에 포함된 α 및 β 값은, 성토종료 이후 경과된 t 시간 동안의 실측 침하량을 기초로 하여 $\frac{t}{S_t - S_0}$ 값을 계산한 다음, t 와 $\frac{t}{S_t - S_0}$ 값의 관계 (그림 1)를 도시하여 결정한다.

또한 호시노(Hoshino) 방법은, 침하는 현장에서의 전단에 의한 유동변형을 포함하여 시간의 평방근에 비례한다는 기본원리를 이용하여 장래침하량을 예측하는 방법으로 \sqrt{t} 법이라고도 한다. 관계식 등 상세한 내용은 참고문헌 4에 기술되어 있다.

이외에 아사오카(Asaoka) 방법은, Terzaghi 1차원 압밀 방정식에 의거 하중이 일정할 때의 침하량을 나타내는 간편식으로 장래 침하량을 예측하는 방법이다. 관계식 등 상세한 내용은 참고문헌 6에 기술되어 있으며, 표 1에 최종 침하량 예측방법에 대하여 비교한 내용이 제시되어 있다.

2.3 선행재하공법 적용시의 지반거동

Stamatopoulos 등(1983)은 선행재하공법의 적용기간 동안 발생하는 침하형태를 분석하여 그림 2에 도시된 바와 같이, 침하곡선을 A-type(S-형태), B-type(기울기가 증가하는 두개의 직선 형태) 및 C-type(한 개의 직선 형태) 등의 세 가지로 분류하였다.

그림 2에서 S-형태의 침하곡선인 A-type은 1차압밀이 기간중에 완료되고, 토층들이 같은 크기의 압밀계수(C_v)를 가지며, 크게 다르지 않은 토층두께를 지니고 있는 경우(Case A, 그림 2(b))에 해당된다. 또한 기울기가 증가하는 두개의 직선 형태인 B-type은 1차압밀이 진행중이고, 토층들이 같은 압밀계수를 가지며, 그러나 매우 다른 토층두께를 지니고 있는 경우(Case B)이다. 이외에 직선형태인 C-type은 1차압밀이 진행중이고, 토층두께는 모두 같지만, 매우 다른 압밀계수를 가지는 토층으로 구성되어 있는 경우(Case C)이다. 아울러 Stamatopoulos 등은 S-형태 침하곡선의 경우, Terzaghi 1차원 압밀이론의 적용이 가능하다고 밝힌 바 있다.

또한 Aldrich(1965)은 선행재하공법에 대하여, Terzaghi의 1차원 압밀이론에 근거한 시간-침하량-평균압밀도 사이의 관계를 직접 이용하는 침하해석은, 연직배수재를 사용하여 침하를 촉진시킨 경우와 과잉간극수압의 소산과정에서 지체현상을 보이지 않는 경우에는 적절하다고 밝힌 바 있으나, 만약 연직배수재를 설치하지 않는 보다 일반적인 경우의 침하해석에 대해서는 이와 같은 관계의 직접적인 적용이 불안전측의 평가를 유발할 수 있다고 언급한 바 있다. 즉 연직배수재를 설치하지 않은 경우, 평균압밀도가 소요값에 도달하였을 때, 압밀점토층의 중앙부에서는 최종하중 작용시 발생할 것으로 예상되는 유효응력보다 훨씬 작은 크기의 유효응력

표 1. 장래침하량 예측방법의 비교

방법	개요	평가
호시노(Hoshino) 방법	침하량을 $S = S_i + Ak \frac{\sqrt{t - t_0}}{\sqrt{1 + k^2(t - t_0)}}$ 로 가정한다.	<ul style="list-style-type: none"> • 이론적이지 못하다. • 2차 압밀을 고려하지 못한다.
쌍곡선 방법	침하량을 $S = S_0 + \frac{t - t_0}{\alpha + \beta(t - t_0)}$ 로 가정한다.	<ul style="list-style-type: none"> • 경험식이다. • 2차 압밀을 고려한다. • 짧은 기간(수개월) 예측이 편리하다.
아사오카(Asaoka) 방법	1차압밀이론의 간이식과 실측결과를 일치시킨다.	<ul style="list-style-type: none"> • 이해하기 쉽다. • 2차압밀을 고려하지 못한다.

이 발생하게 된다. 이와 같은 현상은 과잉간극수압의 소산이 특히 압밀점토층 중앙부에서는 늦어지기 때문이다. 따라서 중앙부에서 압밀을 충분히 유발시켜 최종하

중 작용시 과잉간극수압이 발생해서는 안 되며, 그러기 위해서는 선행재하과정에서의 유효응력이 최종하중 작용시 발생하게 되는 유효응력 보다 커야 한다.

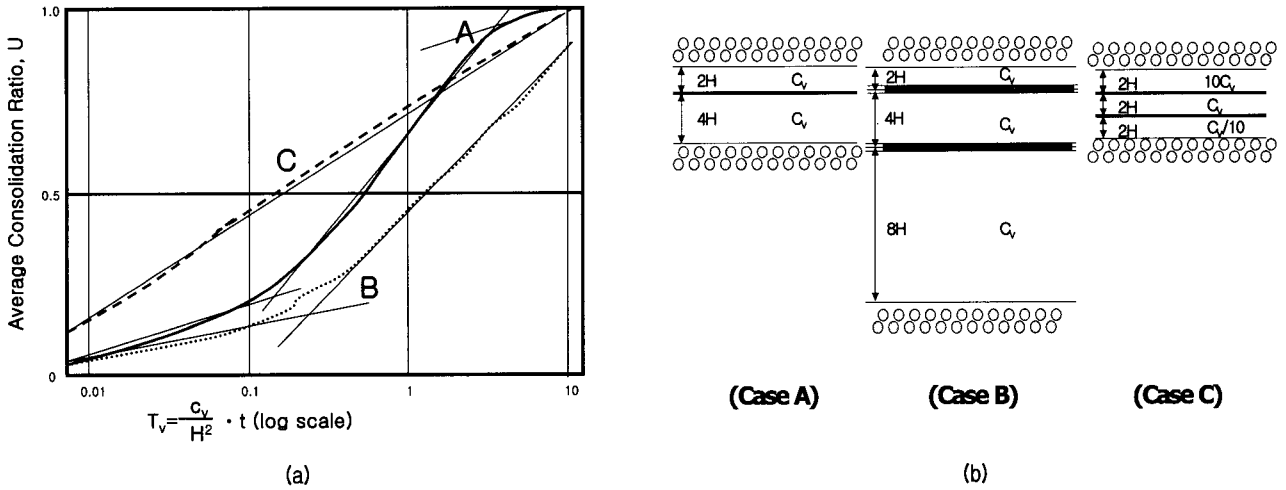


그림 2. 선행재하공법 적용시의 침하형태(Stamatopoulos 등, 1983)

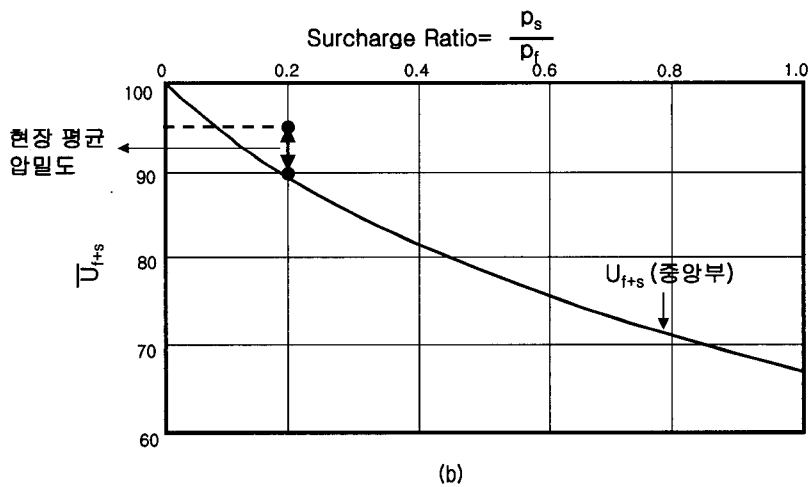
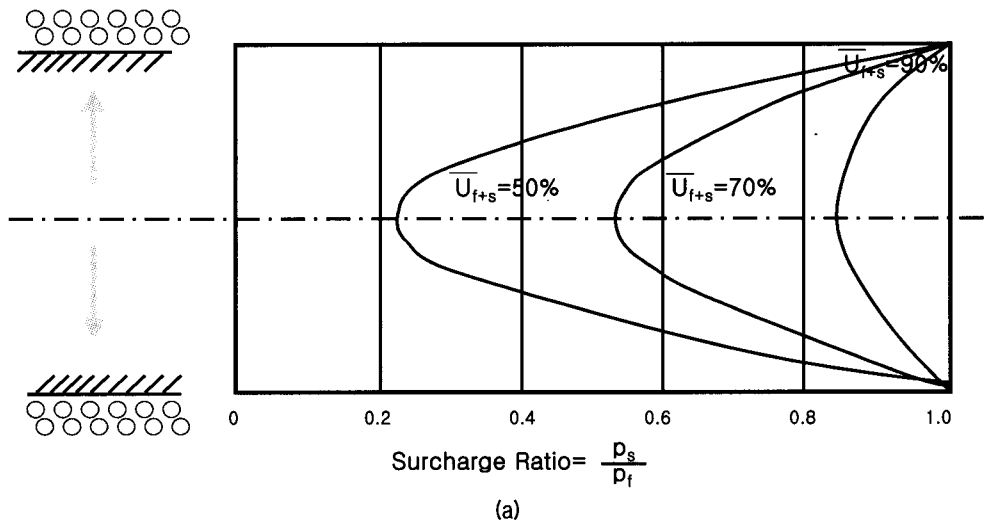


그림 3. 상재하중비 및 평균압밀도에 따른 깊이별 압밀도의 변화(Aldrich, 1965)

그림 3(a)에는 Terzaghi의 1차원 압밀이론에 기초하여 제시된 Aldrich(1965)의 연구결과 즉, 상재하중비(surcharge ratio) 및 평균압밀도에 따른 점토층 임의의 깊이에서의 압밀도가 도시되어 있다.

그림 3(a)에서 예를 들어, 평균압밀도 50%의 1차압밀이 발생하였을 때, 점토층 중앙부 깊이에서의 압밀도는 23%에 해당된다. 이 때 상재하중의 절반을 제거하게 되면, 점토층 중앙부에서는 1차압밀이 지속적으로 발생하게 될 것이다. 이러한 중앙부에서의 1차압밀을 완전히 종료시키기 위해서는 점토층의 평균압밀도는 67% 이상 되어야 한다. 따라서, 점토층 중앙부에서의 1차압밀을 완전히 종료시키기 위해서는 아래 식 (3)의 조건이 충족 되어야 한다.

$$U_{f+s} \text{ (중앙부)} \geq \frac{p_f}{p_s + p_f} \quad (3)$$

여기서, U_{f+s} : 선행재하공법 적용시 점토층 중앙부 깊이에서의 압밀도

p_f : 최종하중

p_s : 선행재하하중

식 (3)의 왼쪽항(U_{f+s})은 점토층 중앙부 깊이에서의 압밀도를 의미하며, 여기서의 압밀도는 과잉간극수압의 소산($1 - \frac{du}{u_0} = \frac{p_0 + \Delta p}{p_f}$)이라는 관점에서의 압밀도로 생각할 수 있다. 따라서, 점토층 중앙부 깊이에서 선행재하를 제거했을 시점에서의 유효응력이 최종 영구구조물에 의해 점토층 중앙부에서 100% 압밀되었을 시점에서의 유효응력보다 크게 되면, 선행재하공법 제거 이후 시점에서는 추가적인 유효응력의 증가는 기대할 수 없으며, 따라서 1차압밀은 종료된 상태라고 판단할 수 있다. 그림 3의 상재하중비는 식 (3)으로부터 P_s/P_f 로 정의되며, 그림 3(b)에는 Terzaghi 1차원 압밀이론을 토대로 평가된 결과, 점토층 중앙부에서 1차압밀이 완전히 종료되기 위해서 요구되는 상재하중비-평균압밀도 사이의 관계가 굵은 실선으로 도시되어 있다.

2.4 재압축지수

Nagaraj 등(1985)은 포화된 압축토층의 과압밀을 유발시키는 메카니즘 및 선행압밀하중의 본질을 아래와 같이 설명하였다.

① 전체응력이 줄거나 또는 간극수압이 커짐으로 인한

유효응력의 감소로 응력의존적인(stress dependent) 선행압밀하중이 유발된다.

② 재하속도의 변화나 2차압축 또는 경시효과(aging) 등에 의한 흙의 구조변화로 시간의존적인 선행압밀하중이 유발된다.

③ 환경이나 화학적 요인이 접합제로 작용하여, 유사 선행압밀하중(pseudo preconsolidation pressure)이 유발된다.

또한 Nagaraj 등은, 위의 ① 및 ②의 경우에 해당되는 토층의 재압축지수(C_r) 평가식을 제시하였으며, 이를 정리하면 식 (4)와 같다.

$$C_r = -de/d(\log p) = 0.0463 \left[\frac{w_L(\%)}{100} \right] G_s \quad (4)$$

여기서, p : 유효상재하중(kPa)

w_L : 액성한계

G_s : 흙의 비중

아울러 Nagaraj 등은 e - $\log p$ 관계로부터, 위의 ① 및 ②의 경우에 해당되는 토층의 압축방정식을 유도하였으며, 이를 정리하면 식 (5)와 같다.

$$(e/e_L) = 1.122 - 0.188 \log p_c - 0.0463 \log p \quad (5)$$

여기서, e : 현재상태의 간극비

e_L : 액성한계에서의 간극비

p_c : 응력 또는 시간 의존적인 선행압밀하중(kPa)

식 (4) 및 (5)는 위의 ③에서 기술된 토층의 경우에는 적용할 수 없으며, ③의 경우에 해당되는 유사 선행압밀하중의 평가를 위해, Nagaraj 등은 비배수 현장배인전단강도를 토대로 한 경험식을 아래와 같이 제시한 바 있다.

$$p_c = 3.78 c_u - 2.9 \quad (6)$$

여기서, p_c : 유사 선행압밀하중(kPa)

c_u : 비배수 현장배인전단강도(kPa)

여기서, 식 (6)으로부터 평가되는 유사 선행압밀하중이 식 (5)로부터 평가되는 시간 또는 응력 의존적인 선행압밀하중 보다 작을 경우에는, 위에서 기술한 ① 또는 ② 경우의 토층에 해당되며, 따라서 이와 같은 토층의 경우에는 식 (4)로부터 재압축지수의 결정이 가능하다.

2.5 2차 압밀침하의 거동특성

구조물의 축조가 완료된 이후, 장기적인 2차압밀로 인해 발생이 예상되는 침하량의 평가에 일반적으로 적용되는 식을 정리하면 아래와 같다.

$$S_2 = \frac{C_\alpha}{1 + e_f} H_0 \log \frac{t}{t_p} \quad (7)$$

여기서, S_2 : 2차압밀침하량
 C_α : 2차압밀계수
 e_f : 1차압밀 종료시점의 간극비
 H_0 : 점토층의 총두께
 t : 경과시간
 t_p : 1차압밀 종료시점

식 (7)로부터, 2차압밀침하에 관련된 주요 요소는 C_α 및 t/t_p 임을 알 수 있다. 여기서 t/t_p 가 2차압밀침하에 미치는 영향을 살펴보면, 실내시험의 경우에 점토시료의 1차압밀 기간이 매우 짧기 때문에 t/t_p 값은 상당히 크게 된다. 그러나 실제 현장지반의 경우, t_p 값이 적게는 몇 개월에서 많게는 몇 년까지 되고, 따라서 t/t_p 값이 100을 넘는 경우는 거의 없으며, 대부분 10 미만의 비교적 작은 값에 해당된다. 따라서, 그림 4에 제시되어 있는 바와

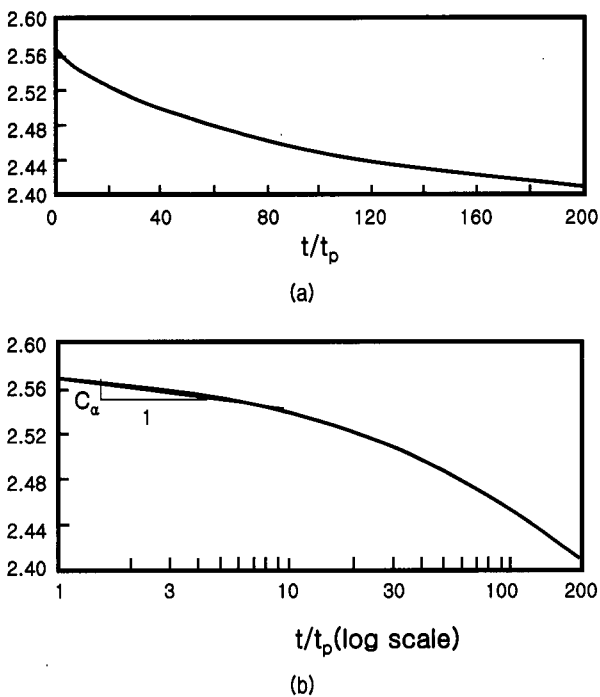


그림 4. Olga clay에 대한 시간의 경과에 따른 2차압밀계수의 변화

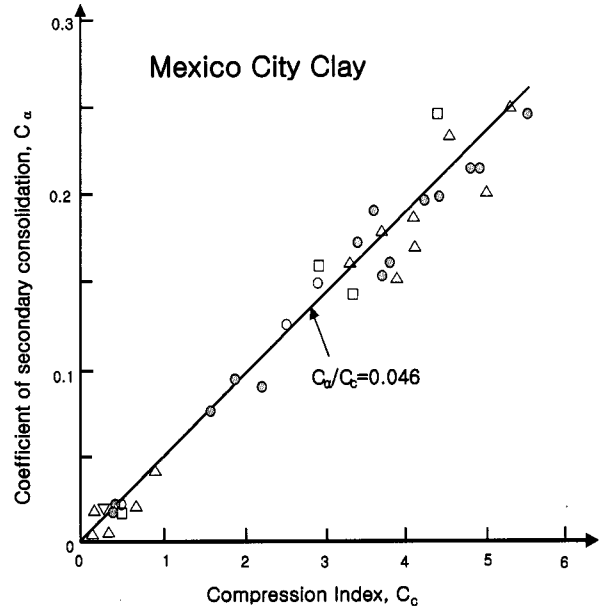


그림 5. Mexico City Clay에 대한 2차압밀계수-압축지수 사이의 관계

같이, 2차압밀계수(C_α)는 t/t_p 에 따라 변하지만, 그 기간이 10 미만의 경우에 해당하는 실제 현장에서는 일정하다고 가정하여도 오차가 매우 작게 발생하는 것을 알 수 있다.

또한 식 (7)에 포함된 2차압밀계수(C_α)와 관련하여 살펴볼 때, 압축성을 나타내는 흡입자 사이의 구조변화는, 경과시간 및 이에 따른 유효응력의 변화 등을 종합적으로 연계하여 예측함이 바람직하다. 그림 5에 도시된 바와 같이, Mexico City Clay 불교란 시료의 경우(선형압밀하중과 유효상재하중의 비가 $\sigma'_p/\sigma'_{v0}=1.4$, 소성 한계 $w_p=91\%$, 액성한계 $w_L=361\%$, 자연함수비 $w_0=313\sim 340\%$ 인 경우), 2차압밀계수(C_α)와 압축지수(C_c)의 비 (ratio)에 해당되는 $C_\alpha/C_c(=\alpha)$ 값이 압축구간 및 재압축구간 모두에서 거의 일정하다는 시험결과를 Mesri & Godlewski(1977)가 제시한 바 있다.

여기서 압축지수(C_c)는, 압축구간과 재압축구간 모두에서 $e-\log \sigma'_v$ 곡선의 기울기를 나타내는 $\Delta e/\Delta \log \sigma'_v$ 로 정의된다. 또한 2차압밀계수(C_α)는 $\Delta e/\Delta \log t$ 로 정의되며 따라서 경과시간(t) 및 이에 따른 유효응력(σ'_v)의 변화와 함께 바뀌게 됨이 일반적인 현상이다(Mesri & Godlewski, 1977; Mesri & Castro, 1987). 그러나 앞에서 언급한 바와 같이, 대부분의 실제 현장에서의 t/t_p 값은 비교적 작기 때문에, 본 연구에서 초점을 두고 있는 2차압밀침하 해석에 있어서 2차압밀계수(C_α)는 시간의 경과에 관계없이 일정하다고 가정하였다.

3. GIS 기법 등을 활용한 본 연구 제시방법의 현장에의 적용

본 장에서는, 본 연구에서 제시하고자 하는 GIS 기법을 활용하는 대규모 매립지반의 장기적인 침하관리 방법을, 선행재하공법이 적용된 인천국제공항 현장에 직접 적용하여 향후의 예상침하량을 분석하여 보았다.

우선 인천국제공항 현장의 개요를 참고문헌 1의 자료를 토대로 요약·정리하면 다음과 같다.

3.1 현장개요

3.1.1 기초지반의 특성

인천국제공항 부지는 자연상태의 간석지 위에 평균 5m 두께로 준설토를 매립하여 조성하였으며, 1단계 공사로 421만평을 매립하는데 총 6,500만 m³의 토사가 사용되었

다. 이 중 약 80%는 인근 해저의 모래를 준설하여 사용하였고, 나머지는 항공기 운항에 장애가 되는 구릉의 표고 (EL. 52.0m) 보다 높은 주변산지를 절토하여 사용하였다.

인천국제공항 부지에 대한 시추조사는 그림 6과 같이 평균 72m 간격으로 1,400만평 부지 전지역에 걸쳐 실시되었으며, 표준관입시험에 의한 N값이 5 미만인 연약층의 두께를 분포도 형태로 GIS 기법을 활용하여 도시하면 그림 7과 같다.

그림 7의 결과를 살펴보면, 인천국제공항 부지의 연약층 두께는 2.509~26.789m의 범위로 매우 불규칙하게 분포하고 있음을 알 수 있다. 구체적으로 살펴보면, 그림 7에 도시된 A지역(여객 계류장의 일부 지역 및 부근의 활주로 지역)은 연약층이 특히 두텁게 분포하고 있으나, 활주로의 중간 부분 지역은 연약층이 비교적 얇은 분포양상을 보이고 있다. 또한 표 2에는 조사된 인천국제공항 부지 연약층의 토질특성이 정리되어 있다.

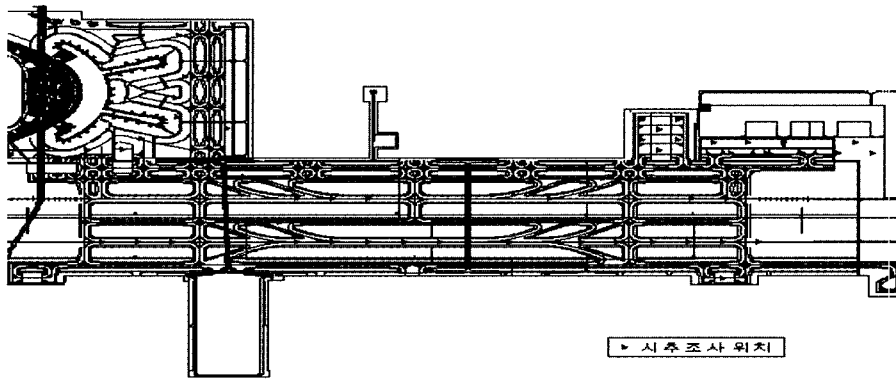


그림 6. 인천국제공항 부지 시추조사 위치

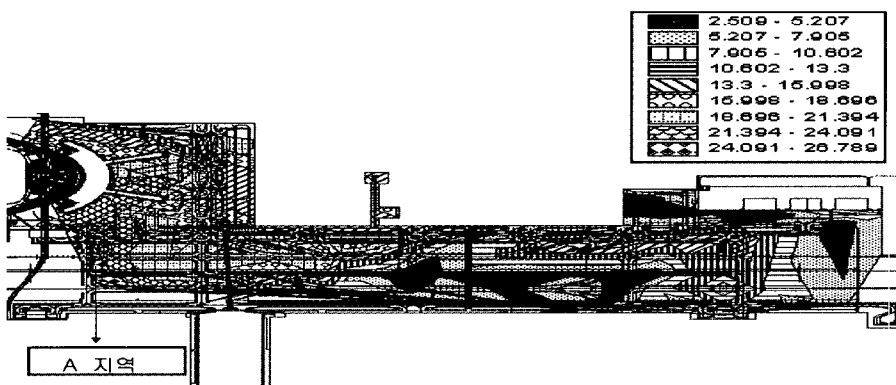


그림 7. GIS 기법을 활용한 인천국제공항 부지 전체 연약층의 두께 분포도(단위 : m)

표 2. 인천국제공항 부지 연약층의 토질특성

입도분포(%)		자연함수비 (%)	액성한계 (%)	소성한계 (%)	초기간극비	압축지수	입밀계수 (cm ² /sec)	비배수강도 (kg/cm ²)
실트	점토							
80~90	10~20	30~50	26~50	10~20	0.9~1.3	0.233	(3~5) × 10 ⁻³	0.10~ 0.25

3.1.2 연약지반처리

인천국제공항 부지의 연약지반처리에는, Sand Drain 공법 및 Plastic Drain Board 공법 등 연직배수공법이 사용되었다. 연약지반처리는 표준관입시험에 의한 N값이 5미만에 해당하는(그림 7참조) 상부 해성층을 대상으로 하였으며, 연직배수재가 설치된 이후 향후 개항시 예상되는 최종하중의 최소 1.2배에 해당되는 크기의 선행하중(preloading)을 약 6개월 동안 재하하여 연약지반의 압밀을 촉진시켰다.

3.1.3 침하량 예측현황

인천국제공항 부지에 대한 침하량 예측은 선행하중 재하시의 연약층 거동을 분석하기 위해 실시하였으며, 침하량 예측을 위해 원지반 위에 100m 간격으로 총 969 개의 지표면 침하계를 그림 8과 같이 설치하였다.

계측빈도는 준설매립시에는 1회/2일로 하였으며, 선행하중 재하시와 선행재하하중이 제거된 시점으로부터 그 이후 1개월간은 1회/일, 선행재하하중이 제거된 시점

으로부터 1~2개월은 1회/3일, 선행재하하중이 제거된 시점으로부터 3~4개월은 1회/주, 또한 선행재하하중이 제거된 시점으로부터 4개월 이후에는 1회/2주 등으로 침하량의 변화 추이에 따라 계측빈도를 서로 달리하여 시행하였다.

또한 계측된 침하량을 GIS 기법을 활용하여 분포도 형태로 도시하면 그림 9와 같다.

그림 9의 결과를 살펴보면, 준설매립이후 선행재하하중 제거이전까지의 침하량은 최소 5.045cm, 최대 130cm로 지역에 따라 차이가 큰 양상을 나타내고는 있으나, 대부분의 지역에서 발생된 침하량은 30~60cm 범위에 해당됨을 알 수 있다.

3.2 향후 침하량의 예측

인천국제공항 부지에 설치된 지표면 침하계의 계측 결과를 토대로, 시공과정에 따라 연약층의 침하에 대한 변화양상을 도시하면 그림 10과 같다.

또한 그림 10에 명기된 바와 같이, 시공 중에는 침하 관리를 위해 969개소의 지표면 침하계가 설치되었으나,

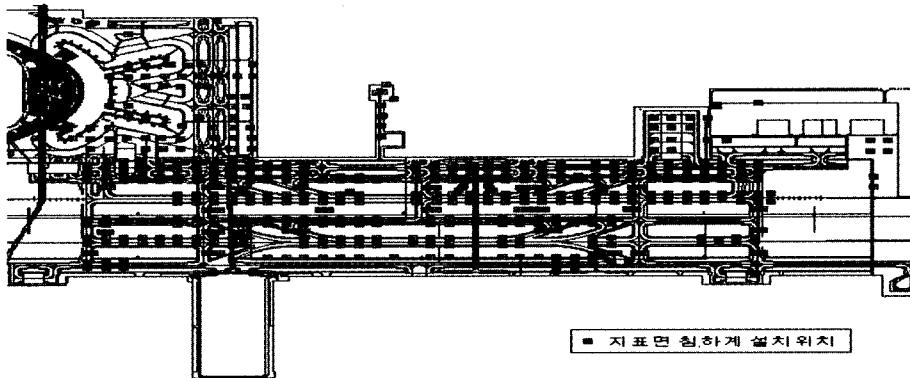


그림 8. 선행하중 재하시에 설치된 지표면 침하계의 위치

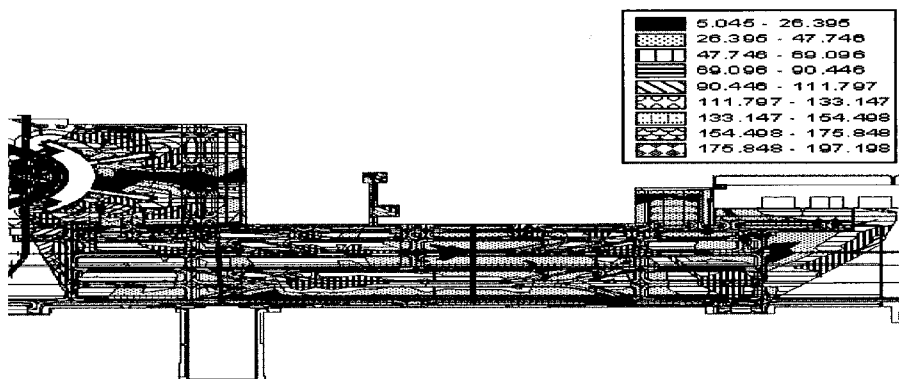


그림 9. GIS 기법을 활용한 선행하중 재하시의 침하량 분포도(단위 : cm)

이들 지표면 침하계는 선행재하하중의 제거시 함께 제거된 상태이고, 그 이후에 장기적인 침하관리를 위해 특히 중요시되는 활주로 부분 포장시 지표면 침하계를 14개소에 추가로 설치하였다.

3.2.1 최종침하량 예측방법의 비교

그림 11은 1996년 9월 18일에서 1999년 4월 17일까지 제1활주로 지역에서의 선행재하를 위한 성토공사의 진행도를 나타내고 있다.

또한 그림 12는 그림 11에 도시된 제1활주로 지역 특

정한 지점에서의 선행재하를 위한 성토과정에서 발생된 연약층의 침하량 예측자료를 도시한 것이다.

그림 12의 결과를 살펴보면, 성토고가 4.845m인 1998년 6월 9일 시점부터 침하량이 급격하게 증가하는 현상을 나타내고 있으며, 이를 통해 이 시점부터 기초지반이 과압밀상태에서 정규압밀상태로 전환됨을 짐작할 수 있다.

여기서 앞의 2.2절에서 기술된 쌍곡선 방법을 이용하여, 본 제1활주로 지역에 대한 선행재하과정에서의 침하량을 예측하여 보면 그림 13과 같으며, 이와 같은 결과는 실제로 현장에서 측정한 침하량과 상관계수가 0.9801

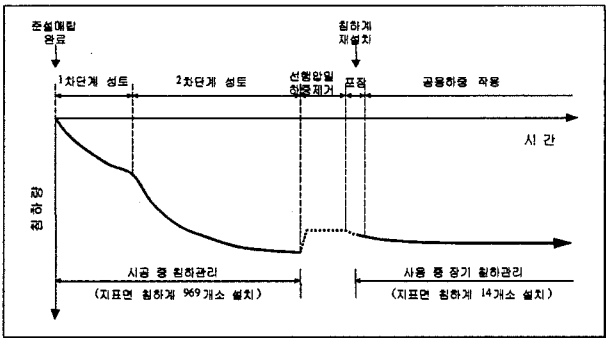


그림 10. 인천국제공항 부지 시공과정에 따른 연약층의 침하양상 및 계측관리 개요도

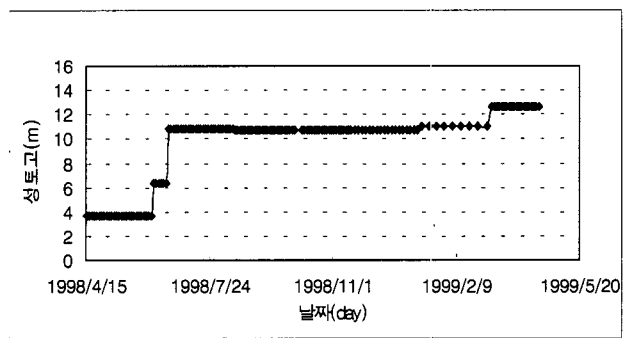


그림 11. 제1활주로 지역 성토공사의 진행에 따른 성토고의 변화

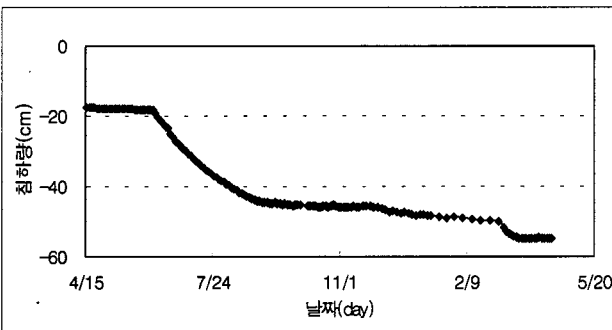


그림 12. 성토공사의 진행에 따른 제1활주로 지역 연약층의 계측침하량 변화

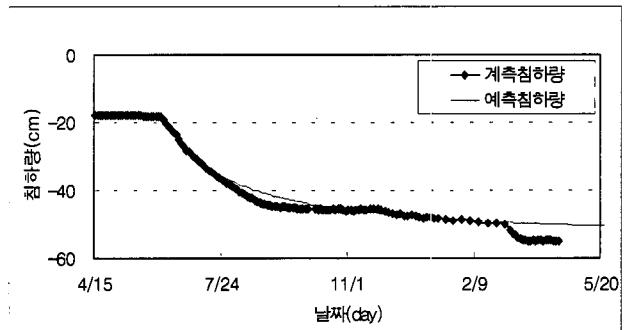


그림 13. 제1활주로 지역 연약층에 대한 침하량 예측결과(쌍곡선 방법)와 계측치의 비교

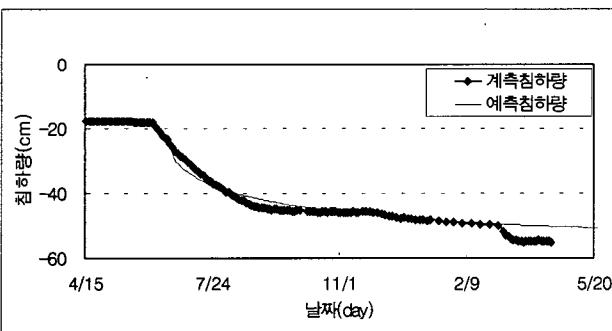


그림 14. 제1활주로 지역 연약층에 대한 침하량 예측결과(호시노 방법)와 계측치의 비교

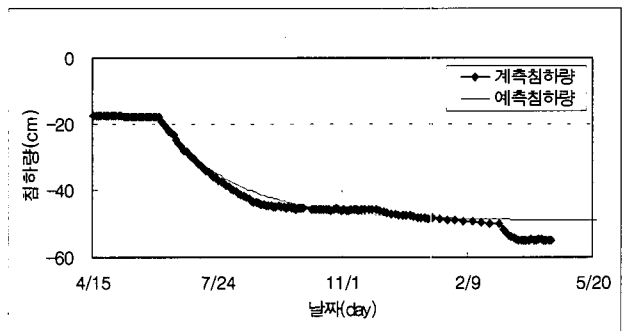
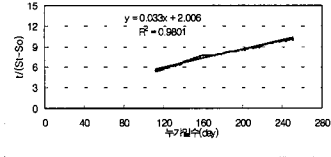
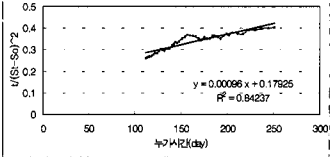
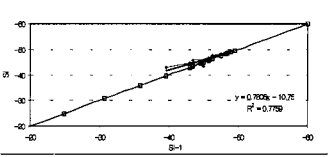


그림 15. 제1활주로 지역 연약층에 대한 침하량 예측결과(아사오카 방법)와 계측치의 비교

표 3. 최종침하량 예측 방법 및 결과

해석 방법	쌍곡선법	호시노법	아사오카 방법
해석 그림			
침하량 예측식	$S_t = S_0 + S' \cdot t = S_0 + \frac{t}{\alpha + \beta t}$	$\frac{t}{(S_t - S_0)^2} = \frac{1}{A^2 K^2} + \frac{1}{A^2} t$	$S_t = \beta_0 + \beta_1 S_{t-1}$
최종침하량 예측식	$S_f = S_0 + \frac{1}{\beta}$	$S_f = S_0 + A$	$S_f = \frac{\beta_0}{1 - \beta_1}$
최종 침하량 (cm)	55.20	57.17	48.97
계수	$\alpha = 2.01$ $\beta = 0.03$	A = 32.27 K = 0.07	$\beta_0 = -10.75$ $\beta_1 = 0.78$

인 상관관계를 보이고 있다.

또한 그림 14에는 제1활주로 지역에 대해 호시노 방법을 이용한 침하량 예측결과가 제시되어 있으며, 예측된 침하량과의 상관계수는 0.8428이다.

아울러 그림 15에는 아사오카 방법에 의한 예측결과가 제시되어 있으며, 상관계수는 0.7759이다.

또한 각 방법으로부터 예측된 본 제1활주로 지역에 대한 최종압밀침하량은, 55.20cm(쌍곡선 방법), 48.97cm(호시노 방법) 및 57.17cm(아사오카 방법) 등이다. 표 3에 최종침하량 예측방법에 대한 해석 그림, 침하량 예측식, 최종침하량 예측식, 상관계수 및 각각의 해석 방법에서 도출된 계수가 제시되어 있다.

본 연구에서는 이와 같은 접근방법을 인천국제공항 부지 전체지역(지표면 침하계가 설치된 969개소 지점을 대상으로)으로 확장하여, 위에서 언급한 3가지 방법(쌍곡선 방법, 호시노 방법 및 아사오카 방법 등)을 각각 이용하여, 선행재하공법 적용 이후부터 선행재하하중 제거 이전까지의 다양한 시점에서의 침하량을 예측하여 보았으며, 이 예측결과를 969개소에 설치된 지표면 침하계의 계측자료들과 서로 비교하여 종합적으로 상관관계를 분석한 바, 쌍곡선 방법의 경우는 상관계수가 0.9682로, 아사오카 방법의 경우는 0.9384로, 또한 호시노 방법의 경우는 0.9186 등으로 각각 평가되었다. 이와 같은 평가결과는, 쌍곡선 방법의 경우 비균질한 지반, 연직배수재를 설치한 지반 및 비선형 조건 등에 대해 적용성이 비교적 양호하다는 Tan 등(1991, 1993)의 연구내용과 대체적으로 부합되는 결과이며, 따라서 본 연구에서는 신뢰성이 상대적으로 크다고 판단되는 쌍곡선 방법

을 토대로, 인천국제공항 부지 연약층에 대해 지표면 침하계가 설치된 969개소 지점을 대상으로 선행재하하중 제거시점의 평균압밀도를 각각 평가하여 보았다. 참고적으로, 인천국제공항 공사현장에서 선행재하공법 적용 이후, 선행재하하중 제거시점을 결정하는 기준은 침하량을 토대로 평균압밀도가 90% 이상 도달한 시점이었다.

3.2.2 현재의 침하형태 분석

본 연구에서는 계속해서, 앞 절에서 기술된 쌍곡선 방법을 이용하여 지표면 침하계가 설치된 969개소 지점을 대상으로 최종압밀침하량을 각각 예측하고, GIS 기법 및 보간법을 활용하여 얻어진 전체연약층에대한 최종압밀침하량의 예측치와 선행재하하중 제거시점에서 계측된 침하량과 서로 각각 비교하여 보았다. 이를 통해 여객계류장 부근의 극히 일부분을 제외한 거의 모든 지점에서 평균압밀도가 최소 90% 이상임을 확인하였으며, 이 결과를 도시하면 그림 16과 같다.

그림 17은 그림 12에 도시된 제1활주로 지역에서의 선행재하를 위한 성토과정에서 발생한 연약층의 침하량 계측자료를 가로축에 해당되는 경과시간을 log scale로 하여 도시한 결과이다.

그림 17에서 알 수 있듯이, 인천국제공항 제1활주로 현장의 선행재하시 침하곡선은 S자 형태와 거의 유사하며, 따라서 이는 그림 2(a)의 A-type(2.3절 참조)에 해당되어, 결국 Stamatoopoulos 등(1983)이 밝힌 바와 같이 Terzaghi의 1차원 압밀이론을 토대로 한 깊이별 압밀도의 평가가 가능하다고 판단된다. 그림 17에 도시된 제1활주로 지역, 이외의 지역도 이와 거의 유사한 변화형태를

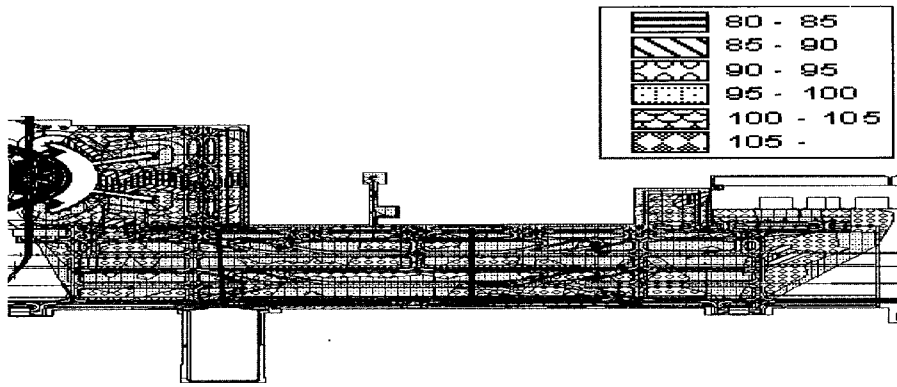


그림 16. 선행재하공법 제거시점의 인천국제공항 부지 전체 연약층에 대한 평균압밀도 분포도

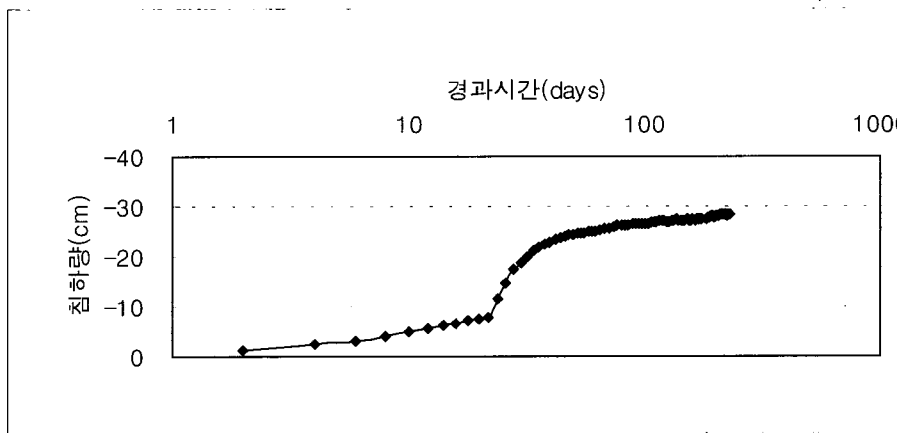


그림 17. 제1활주로 지역 연약층의 계측침하량-log scale 경과시간 사이 관계의 변화형태

보이고 있으나, 본 논문에서는 지면 관계상 생략하였다.

또한 앞의 2.3절 그림 3(b)에는 Terzaghi 1차원 압밀 이론을 토대로 평가된 결과-점토층 중앙부에서 1차압밀이 종료되기 위해 요구되는 상재하중비-평균압밀도 사이의 관계가 굵은 실선으로 도시되어 있다. 본 인천국제공항 공사현장의 경우는, 상재하중비가 최소 0.2이며(3.1.2 절 참조) 또한 본 연구에서는 분석을 통해 선행하중 제거시점에서 전체연약층의 평균압밀도는 최소 90%, 최대 95%임을 확인한 바 있다. 따라서 이와 같은 크기의 상재하중비-평균압밀도의 관계를 정의하는 결과가 앞의 그림 3(b)에 검은 색 점으로 표시되어 있으며, 이는 도시된 굵은 실선 보다 위쪽에 존재하는 상태에 해당된다. 결과적으로 볼 때, 향후 활주로, 도로 등 포장구조체가 설치된 이후에도 하부 연약층에서는 더 이상의 과잉 간극수압 소산은 발생하기 어려운 즉 1차압밀은 종료된 상태로 추정할 수 있다. 따라서 포장구조체 설치 이후 현재까지 발생하고 있는 침하는 2차압밀에 의한 것이라는 판단이 가능하다.

3.2.3 해석절차

본 연구에서는 우선 인천국제공항 공사현장에서 시초조사와 실내시험을 통해 얻은 초기간극비, 액성한계에서의 간극비, 연약층의 두께, 선행압밀하중, 유효상재하중, 비중, 액성한계, 비배수 현장배인전단강도, 선행하중 제거 직후의 간극비 및 1차압밀 종료시간(선행재하공법 적용시점부터 선행재하하중 제거시점까지의 기간) 등 각각을 평면좌표상의 시추조사 지점과 일치되는 지점에 하나의 레이어(layer) 형태의 속성자료로 입력하였고, 전체연약층에 대해서는 보간법을 사용하여 연속적인 분포형태로 표시하였다.

계속해서, 앞의 2.5절에 제시된 식 (7) 및 활주로 중앙부분 14개소에서 선행재하하중 제거 이후 현재까지 계속되고 있는 지표면 침하량 등을 토대로 14개소 지점 각각에 대한 2차압밀계수를 역산하였다. 또한 Mesri & Godlewski(1977)가 제시한 과압밀상태에서의 2차압밀계수(C_a)와 재압축지수(C_r) 사이의 비(ratio, α)를 정의하는 관계식($C_a/C_r = \alpha$, 2.5절 참조)을 토대로, 14개소

표 4. 장기침하에 의해 예측된 C_r , C_a 및 α

지표면 침하계 설치 위치			C_r	C_a	α
제1활주로 및 유도로 지역	유도로	지표면 침하계L	0.048428	0.000798987	0.016498
		지표면 침하계R	0.047021	0.000998969	0.021245
	활주로	지표면 침하계L	0.04	0.0010973	0.027433
		지표면 침하계R	0.04	0.000904553	0.022614
	유도로	지표면 침하계	0.04363	0.00238301	0.054619
	제2활주로 및 유도로 지역	유도로	지표면 침하계L	0.041369	0.000696509
지표면 침하계R			0.04	0.000552709	0.013818
활주로		지표면 침하계	0.035062	0.00159242	0.045417
유도로		지표면 침하계L	0.04	0.00171023	0.042756
		지표면 침하계R	0.04	0.000559508	0.013988
활주로		지표면 침하계	0.030839	0.00159242	0.051637
여객 계류장 지역	여객계류장	지표면 침하계	0.03	0.00121938	0.040646
		지표면 침하계	0.030642	0.00398596	0.130082
	평균		0.038413	0.001321832	0.036502

지점 각각에 대해 산정된 α 값의 평균치를 구한 다음, 인천국제공항 부지 전체연약층에 대한 2차압밀계수는 앞서 결정된 평균치 α 값에 각각의 재압축지수를 곱하여 확정하였다. 이 과정에서 산출된 재압축지수(C_r)와 2차압밀계수(C_a) 및 α 값은 표 4와 같다. 여기서, 활주로

부분 14개소 지점을 포함하여 전체연약층에 대한 재압축지수를 결정하는 과정을 정리하면 다음과 같다.

우선 앞의 2.4절에 제시된 Nagaraj 등(1985)의 이론을 토대로, 인천국제공항 부지 전체연약층에 대해 이미 속성자료로 입력되어 있는 자료 중, 현재상태의 간극비(선

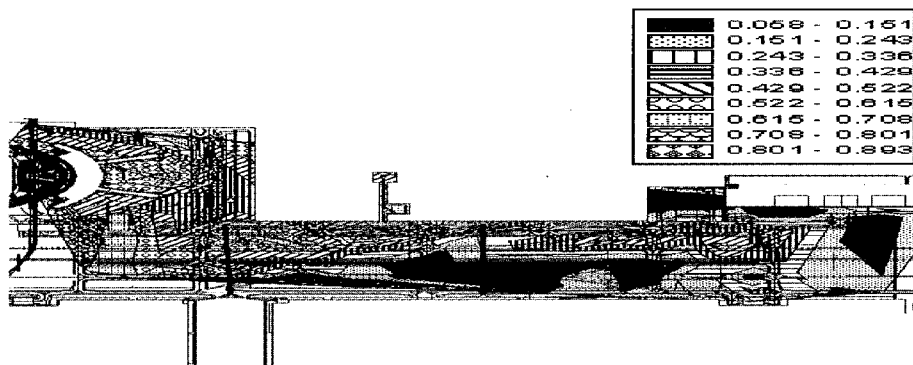


그림 18. GIS 기법을 활용한 인천국제공항 전체 연약층에 대한 향후 50년 후의 예상침하량 분포도(단위 : cm)

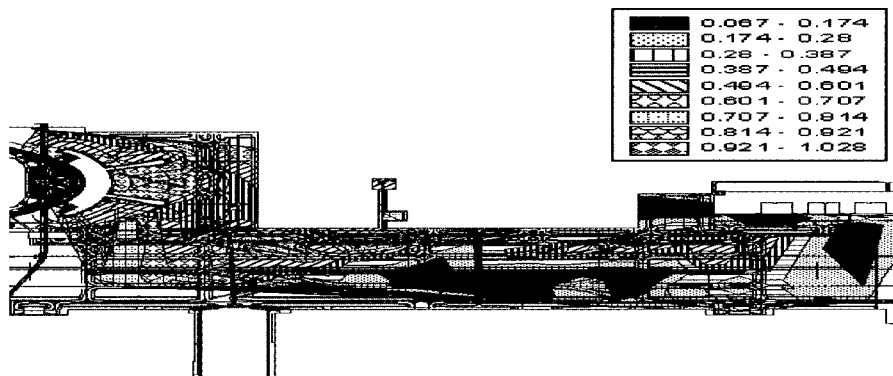


그림 19. GIS 기법을 활용한 인천국제공항 전체 연약층에 대한 향후 100년 후의 예상침하량 분포도(단위 : cm)

행재하하중 제거 직후의 간극비로 가정함), 액성한계에 서의 간극비, 유효상재하중 및 비배수 현장배인전단강도 등을 식 (5) 및 식 (6)에 대입하여 선행압밀하중을 각각 산정한 다음 그 크기를 서로 비교하였다. 비교결과, 전체연약층 모두에 대해 식 (5)로부터 산정된 선행압밀하중이 큰 것을 알 수 있었다. 결국 본 인천국제공항 부지 전체연약층은 모두 2.4절 서두에 기술한 ① 또는 ② 경우의 토층에 해당되며, 따라서 GIS 기법을 이용하여 이미 속성자료로 입력되어 있는 흙의 비중에 대한 레이어와 액성한계에 대한 레이어를 조합시켜 식 (4)로부터 재압축지수의 결정이 이루어 졌다.

최종적으로, 본 인천국제공항 부지 전체연약층에 대해 결정된 2차압밀계수와 연약층의 두께, 선행재하하중 제거 직후의 간극비 및 1차압밀 종료시간 등 모든 자료를 앞의 2.5절 식 (7)에 대입하여, 향후의 2차압밀 침하량을 예측하였다.

예측결과, 현재(2001. 8)로부터 향후 100년까지의 동안에 추가로 발생이 예상되는 침하량은, 10년 후에는 최대 0.53cm, 20년 후에는 최대 0.716cm, 30년 후에는 최대 0.795cm, 40년 후에는 0.85cm, 50년 후에는 최대 0.894cm, 또한 100년 후에는 최대 1.194cm 등으로 추정되며, 여기서 50년 후 및 100년 후 각각에 대한 예상침하량 분포 현황을 GIS 기법을 이용하여 시각적으로 도시하면 그림 18 및 19와 같다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는, 지리정보체계(GIS, Geographic Information System) 기법을 활용하여 대규모 매립지반의 장기적인 침하관리를 보다 효율적으로 수행할 수 있는 새로운 접근방법을 제시하였다. 또한 제시된 접근방법의 적용성을 확인하기 위해, GIS 기법 등을 활용하여 선행재하공법이 적용된 인천국제공항 부지 전체연약층에 대한 향후 예상침하량을 추정하여 보았으며, 그 과정을 순서에 따라 요약·정리하면 다음과 같다.

(1) 지표면 침하계가 설치된 969개소 지점에 대해 쌍곡선 방법을 이용하여 최종침하량을 예측하였으며, GIS 기법 및 보간법을 활용하여 전체연약층에 대한 얻어진 최종침하량의 예측치와 선행재하하중 제거 시점에서 계측된 침하량을 서로 각각 비교하여 보았다. 이를 통해 여객계류장 부근의 극히 일부분을 제

외한 거의 모든 지점에서 평균압밀도가 최소 90% 이상임을 확인하였다.

- (2) 선행재하과정에서의 침하곡선은 S자 형태와 거의 유사하며, 따라서 Terzaghi 1차원 압밀이론을 토대로 제시된 Aldrich의 연구결과에 근거하여 볼 때, 상재하중비가 최소 0.2이고 또한 선행하중 제거시점에서의 기초지반 평균압밀도가 최소 90% 이상인 경우, 향후 활주로 등 포장구조체가 설치 완료된 이후에도 하부 기초지반에서 더 이상의 과잉간극수압 소산은 발생하기 어려운 상태로 추정되며, 결국 활주로 등 포장구조체가 설치 완료된 이후 현재까지 발생하고 있는 침하는 2차압밀에 의한 것이라는 판단이 가능하다.
- (3) GIS 기법을 활용하여, 시초조사와 실내시험을 통해 얻은 초기간극비, 액성한계에서의 간극비, 연약층의 두께, 선행압밀하중, 유효상재하중, 비중, 액성한계, 비배수 현장배인전단강도, 선행하중 제거 직후의 간극비 및 1차압밀 종료시간 등 각각을 평면좌표상의 시추조사 지점과 일치되는 지점에 하나의 레이어 형태의 속성자료로 입력하였고, 전체연약층에 대해서는 보간법을 사용하여 연속적인 분포형태로 표시하였다.
- (4) Nagaraj 등이 밝힌 연구결과에 근거하여, GIS 기법 및 보간법을 활용하여 전체연약층에 대해 속성자료로 입력되어 있는 자료 중, 현재상태의 간극비, 액성한계에서의 간극비, 유효상재하중 및 비배수 현장배인전단강도 등을 토대로 응력 또는 시간 의존적인 선행압밀하중의 경우임을 확인한 다음, 속성자료로 입력되어 있는 흙의 비중에 대한 레이어와 액성한계에 대한 레이어를 조합시켜 전체연약층에 대한 재압축지수의 결정이 이루어 졌다.
- (5) 활주로 중앙부분 14개소에서 선행재하하중 제거 이후 현재까지 계속 계측되고 있는 지표면 침하량 등을 토대로 14개소 지점 각각에 대한 2차압밀계수를 산정하였으며, 또한 Mesri & Godlewski가 제시한 과압밀상태에서의 2차압밀계수와 재압축지수 사이의 비를 정의하는 관계식을 토대로, GIS 기법 및 보간법을 활용하여 전체연약층에 대한 2차압밀계수를 결정하였다.
- (6) 최종적으로 GIS 기법을 활용하여, 전체연약층에 대해 결정된 2차압밀계수와 연약층의 두께, 선행하중 제거 직후의 간극비 및 1차압밀 종료시간 등 모든

자료를 토대로 향후의 2차압밀 침하량을 예측한 바, 현재(2001. 8)로부터 향후 100년까지의 동안에 추가로 발생이 예상되는 침하량은, 50년 후에는 최대 0.894cm, 또한 100년 후에는 최대 1.194cm 등으로 추정된다.

감사의 글

본 연구의 수행과정에서 자료제공에 적극 협조해 주신 인천국제공항공사 관계자 여러분들께 깊이 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김영웅, 김학중, 고문수, 최인걸(2001) "특집 (I) - 신공항 : 인천국제공항 토목시설공사를 위한 연약지반개량 시공사례 연구", 한국지반공학회지, Vol.17, No.1, pp.12~29.
2. 김영표, 박종택, 한선희(1999) "GIS 기초와 실제", 하나디앤피, 서울, pp.55~140.
3. 최봉문, 김항집, 서동조(1999) "도시정보와 GIS", 도서출판 大旺社, 서울, pp.93~179.
4. 星埜和(1962) "最近における基礎の諸問題", 日本土木學會紙, Vol.47, No.7, pp.63~67.
5. Aldrich, H. P.(1965), "Precompression for support of shallow foundations", Jour. of Soil Mechs. and Found. Div., ASCE 91, No.2, pp.5~20.
6. Asaoka, A.(1978), "Observational procedure of settlement prediction", Soils and Found., 18(4), pp.89-101.
7. Johnson, S, J.(1970), "Precompression for improving foundation soils", Jour. of Soil Mechs. and Found. Div., ASCE 96, No.1, pp.111~144.
8. Mesri, G., and Castro, A.(1987), "The C_e/C_c concept and K_0 during secondary compression", Jour. of Soil Mechs. and Found. Div., ASCE 113, No.GT3, March, pp.230~247.
9. Mesri, G. and Godlewski, P. M.(1977). "Time- and stress-compressibility interrelationship", Jour. of the Geotech. Eng. Div., ASCE 103, No.GT5, pp.417~430.
10. Nagaraj, T. and Murty, B. R. S.(1985), "Prediction of the preconsolidation pressure and recompression index of soils", Geotechnical Testing Jour., Vol.8, No.4, pp.199~202.
11. Stamatopoulos, A. C. and Kotzias, P. C.(1983), "Settlement-time predictions in preloading", Jour. of Geotech. Eng., Div., ASCE 109, No.6, pp.802~820.
12. Tan, T. S(1993), "Ultimate settlement by hyperbolic plot for clays with vertical drains", Jour. of Geotech. Eng., Div., ASCE 119, No.5, pp.950~956.
13. Tan, T. S., Inoue, T., and Lee, S. L.(1991), "Hyperbolic method for consolidation analysis", Jour. of Geotech. Eng., Div., ASCE 117, No.11, pp.1723~1737.

(접수일자 2002. 1. 11, 심사완료일 2002. 4. 6)