

유기질층을 포함한 고소성 실트질 연약지반의 침하 예측

Prediction of Settlement for the Highly Plastic and Silty Soft Ground Contained of the Organic Deposits

유 남 재* 김 겸** 유 창 선***
Yoo, Nam-Jae Kim, Kyum Yoo, Chang-Sun

Abstract

In this thesis, from the results of settlement measurement performed at the site where embankment earthwork was carried out on the ground consisting of highly plastic and silty soft soils interlayered with organic deposits, various methods of predicting the embankment settlement such as Hoshino's method, Asaoka's method, hyperbolic method, \sqrt{s} method and Monden's method were used to investigate their applicability and the inverse method of finding the soil parameter related to consolidation was used to predict the consolidation behavior in the future.

It was confirmed that reliable prediction of consolidation behavior under various conditions could be done to estimate soil parameter related to consolidation such as the consolidation index and consolidation coefficient by the inverse method of comparing the measured settlement with the predicted value by the settlement prediction methods.

키워드 : 유기질토, 연약지반, 침하예측

Keywords : *organic soil, soft ground, prediction of settlement*

1. 서론

토지의 가용면적의 확대 필요성, 해안에 시공되는 항만건설 등과 같이 토질조건이 좋지 못한 해안이나 하안 등에 위치한 연약지반을 활용해야 할 필요성이 계속적으로 높아지고 있다. 그러나, 연약지반은 지지력이 매우 약하고 침하가 장기간에 걸쳐 크게 발생하는 경우가 대부분이며, 이러한 지반을 활용하기 위해서는 지반개량이 필수적인 요소로 오래전부터 여러 가지 형태의 공법이 개발되어 왔다. 연약지반을 개량하는 공법으로는 개량목적과 대상지반 등에 따라 치환, 프리로딩, 연

직배수, 전기침투, 침투압, 진동다짐 등 여러 방법이 있으며, 특히 연약한 점성토 지반의 압밀을 촉진하기 위한 공법으로는 연직배수공법이 대표적으로 적용되고 있다.

연직배수공법이 적용된 연약지반이 안정적인 지반으로 조성되기 위하여 압밀침하가 진행되어 향후의 잔류침하량이 상부 구조물에 안정적인 영향을 미칠 수 있는 범위내로 형성되어야 한다. 이러한 압밀거동은 다양한 압밀이론을 도입하여 예측되고 있으나 흙의 불균질성, 토질시험에 의한 지반정수 결정과 관련한 문제점, 해석이론의 가정상 한계 등으로 실제거동과 상이한 결과를 보이기도 한다. 따라서, 이를 보완하기 위하여 현장에서는 실측 침하량 자료를 이용하여 최종침하량과 압밀도달시간을 결정하는 현장 예측기법이 사용되고 있다. 현장에서 침하를 예측하는 기법으로 Hoshino 법(1962), Asaoka법(1978), 쌍곡선법(1991), \sqrt{s} 법

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사, 교신지자

** 강원대학교 토목공학과 석사과정

*** 강원대학교 토목공학과 석사과정

(1997), Monden법(1963) 등이 주로 적용되고 있다.

본 연구에서는 연약지반에 유기질이 많이 포함된다면 그 성분으로 인해 윤활작용이 지반을 구성하는 입자들 사이에 작용하여 마찰각이 작아져 지지력이 줄어드는 점과 유기질 성분으로 인해 부식작용이 작용해 지반의 침하 등을 야기할 수 있다는 점을 염두하고, 이로 인해 발생될 구조물의 안정성 문제를 발생시킬 수 있음을 알고 있어야 하며, 유기질토층이 포함된 연약지반의 성토 침하 예측을 위하여 기존의 예측 기법 중 Hoshino법과 쌍곡선법, Asaoka법, Monden법, \sqrt{s} 법을 이용하여 2008년 8월~2009년 1월까지의 계측자료로 침하 예측을 수행하여 실측결과와 비교분석하여 적용성을 검토하였다.

2. 이론적 배경

2.1 유기질토의 압밀특성

Hills(1961)는 저유기질토(유기물함량: 11%)의 간극비는 2보다 작은 값을 나타낸다고 하였고, Takenaka(1977)는 고유기질토의 압밀하중과 강도는 비례관계를 나타낸다고 하였다.

Arman(1969)은 유기물함량이 20%이하인 저유기질토의 경우 Terzaghi(1927)의 압밀이론과 잘 일치한다고 하였으며, 유기물함량이 20%이상인 경우 압밀거동은 유기질 부분의 거동에 의해 크게 지배를 받는다고 하였다.

Taylor(1940)는 토립자의 골격을 역학적 모델로 생각하여 2차 압밀을 이론적으로 설명하였으며, 石井(1955)은 2차압밀에 의한 변형을 고려한 체적압축계수를 사용할 것을 제안하였고, Mersi(1973)는 점토 및 유기질토의 2차 압밀계수의 초기 함수비에 비례하여 증가하는 직선식을 발표하였다. 또한 Mersi(1977)는 점성토 및 유기질토의 압축지수에 대한 2차압밀계수(C_a)의 비가 0.025~0.1의 범위에 속한다고 발표하였다. 2차 압밀은 유기질토가 무기질토보다 더 크게 발생하고 유기질토나 소성이 큰 흙일수록 크게 나타나며, 유기물 함량이 많으면 많을수록 2차압밀계수는 큰 값을 나타내는 특성이 있다.

2.2 침하예측기법

2.2.1 Hoshino법

Hoshino 방법은 Hyperbolic 방법을 수정한 것으로, \sqrt{t} 법이라고도 한다. \sqrt{t} 법은 전 침하가 시간의 평방근에 비례하여 감소한다는 가정에 근거한 것으로 초기의 실측 침하량으로부터 장래 임의시간에서의 침하량이나 최종침하량을 구하는 방법이다.

$$S_t = S_0 + \frac{AK\sqrt{t}}{\sqrt{1+K^2t}} \quad (1)$$

여기서, S_t : 성토 후 경과시간 t에서 침하량

S_0 : 성토 직후의 침하량

t : 성토종료 시점으로부터 경과시간

A, K : 실측 침하량으로부터 구하는 계수

이 식을 다시 정리하면,

$$\frac{t}{(S_t - S_0)^2} = \frac{1}{A^2 K^2} + \frac{t}{A^2} \quad (2)$$

회기직선의 기울기가 $\frac{1}{A^2}$ 이고 절편이 $\frac{1}{(AK)^2}$

이다. 여기서 구한 A, K 를 이용하여 다시 식 (1)에 대입하고 원하는 시점에서의 침하량을 계산하면 된다.

최종침하량은 다음 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$S_f = S_0 + A \quad (3)$$

2.2.2 Asaoka법(직선법)

Asaoka(1978)는 하중을 가한 후 일정기간 동안의 침하자료로부터 전체 침하량과 침하율을 평가하는 방법을 제안하였다.

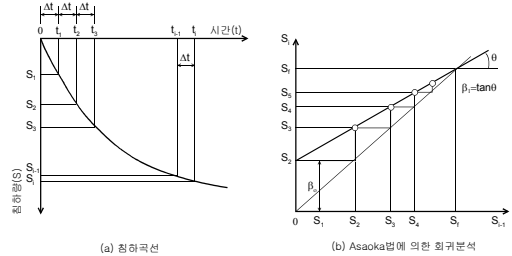


그림 1 Asaoka법의 원리

임의의 시간 t에서 침하량은 다음 식 (4)와 같다.

$$S_t = \beta_0 + \beta_1 S_{t-1} \quad (4)$$

또한, 최종침하량은 다음 식 (5)와 같다.

$$S_f = \frac{\beta_0}{1-\beta_1} \quad (5)$$

Asaoka법을 이용하여 미지수 β_0 및 β_1 을 구하는 방법은 다음과 같다.

① 그림 1(a)와 같이 시간-침하량 곡선을 Δt 의 등간격으로 나눈다.

② 그림 1(b)와 같이 횡축에는 침하량 S_1, S_2, \dots

- 를, 종축에는 침하량 S_2, S_3, \dots 의 점을 표시
- ③ 이 점들을 회귀분석을 통해 하나의 직선(I)으로 표현하였을 때 직선의 기울기가 β_1 , 절편이 β_0 이다.
- ④ 원점에서 45°의 직선을 그어 직선(I)과 만나는 점이 최종침하량이다.

2.2.3 쌍곡선법 (Hyperbolic법)

쌍곡선법은 시간-침하곡선에 대해서 침하의 평균속도가 쌍곡선의 형상으로 감소해 간다고 가정하여 그림 2과 같이 성토완료 후의 시간 t_a 이후의 침하곡선이 쌍곡선식으로 표시되는 것으로, 기본식은 다음 식 (6)과 같다.

$$\frac{t}{S_t - S_0} = \alpha + \beta t \quad (6)$$

- 여기서, S_t : 성토 후 경과시간 t 에서의 침하량
 S_0 : 성토종료 직후의 침하량
 t : 성토종료 시점부터의 경과시간
 α, β : 실측 침하량으로부터 구하는 계수

위의 식은 그림 2과 같이 나타나며 절편과 기울기로부터 α 와 β 를 결정하고 위의 식에 의해 임의의 시간 t 에서의 침하량 S_t 를 구할 수 있다.

최종침하량 S_f 는 $t = \infty$ 일 때 다음 식 (7)로 구할 수 있다.

$$S_f = S_0 + \frac{1}{\beta} \quad (7)$$

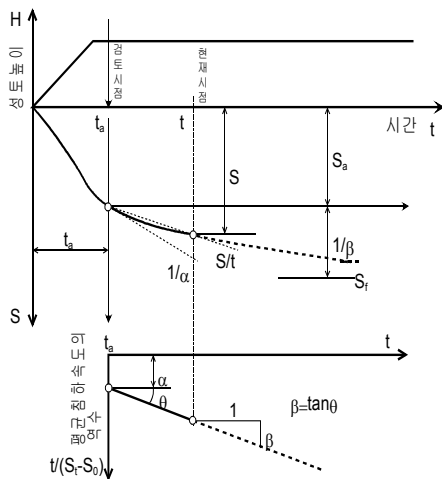


그림 2 쌍곡선법에 의한 침하량 추정

2.2.4 \sqrt{s} 법

\sqrt{s} 방법은 정성교 등(1997)에 의해서 제안된 방

법이다. \sqrt{s} 방법의 시간-침하 관계는 그림 3와 같이 나타나며, Hyperbolic 방법처럼 선형회귀 분석하여 식 (8)의 계수들을 도출, 시간에 따른 침하량을 추정할 수 있다.

$$S_t = S_i + \left(\frac{t - t_i}{\alpha + \beta(t - t_i)} \right)^2 \quad (8)$$

- 여기서, S_t : 성토 후 경과시간 t 에서의 침하량
 S_i : 성토완료 직후의 침하량
 t : 전체 경과시간, t_i : 성토완료 시점
 α : y절편, β : 추세선의 기울기

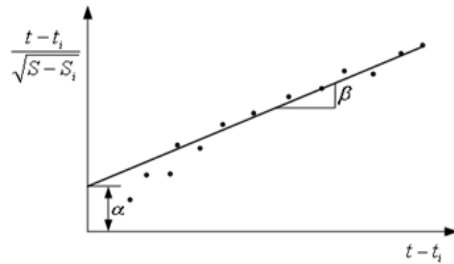


그림 3 \sqrt{s} 방법

최종침하량은 다음 식 (9)을 이용하여 추정할 수 있다.

$$S_{total} = S_i + \frac{1}{\beta} \quad (9)$$

2.2.5 Monden법

이 방법은 Barron이 제안한 평균 압밀도를 구하는 근사식인 $U_r = 1 - \exp\left(\frac{-8T_r}{F(n)}\right)$ 을 변형하여 다음과 같은 식을 도출하였다.

$$\ln(1 - U) = -\frac{8T_r}{F(n)} = -\frac{8c_v t}{F(n) d_v^2} \quad (10)$$

$T_r - \ln(1 - U)$ 가 직선관계가 있다는 것을 이용하여 장래침하량을 예측한다.

3. 지반조사와 침하 예측

3.1 연구대상지역의 지질

본 연구대상지역은 철도시설물 공사 지역으로 행정구역상 강원도 고성군 현내면 저진리 일대에 해당하고, 동해안 인근 민간인 통제지역에 위치한다.

이 지역의 지질은 화강편마암 엽리의 주향은

N20W~N10E로 나타나고 있으며 일부 절취면 사면에 노두가 관찰된다. 층적층은 해안 연안부 및 계곡부 저지대에 3~13m 두께로 나타나고 있으며 특히 계곡부에 폭넓게 분포하고 있다. 점성도는 유기질토가 우세하며 계곡부의 연약지반을 형성하고 있으며 사질토는 해안 연안부에 폭넓게 분포하고 있다.

3.2 지반조사

3.2.1 조사 현황

본 연구대상지역의 지반 조사를 위해서 그림 4의 구역과 같이 시추조사를 하였다.

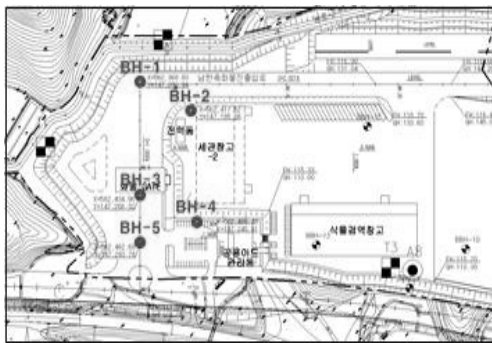


그림 4 시추조사 위치도

BH-1에서 BH-5까지 시추조사를 하여 각 구역의 지층을 표 1~2에 나타내었다.

표 1 지층현황 (심도 : m)

구분	BH-1	BH-2	BH-3	BH-4	BH-5
자갈 전석	3.5	2.7	3.8	2.0	4.0
실트질 모래	10	14.8	13.7	10.5	10.5
실트질 점토	5.5	-	6.3	1.2	9.5
모래질 자갈	10	3.3	-	4.5	-
실트질 모래	-	0.7	4.2	2.3	2.0
풍화토	3.0	2.5	4.5	3.5	4.5
풍화암	2.0	3.0	2.0	1.5	1.0
시추 심도	25.0	27.0	34.5	25.5	31.5

3.2.2 실내토질시험 결과

표 2~5은 실내토질시험인 기본물성시험과 일축

압축시험, 삼축압축시험을 통하여 다음과 같은 결과를 나타내었다.

표 2 기본 물성시험 결과

공번	함수비(%)	비중	액터버그한계	
			LL	PI
BH-1	76.8	2.683	81.9	41.5
BH-3	49.6	2.679	64.7	24.5
BH-5	87.3	2.688	93.4	42.8

표 3 기본 물성시험 결과

공번	체분석				통일 분류
	No.4	No.40	No.200	0.002 (mm)	
BH-1	100	98.59	74.5	25.18	MH
BH-3	100	89.63	61.76	15.4	MH
BH-5	100	97.09	82.51	30.23	MH

표 4 일축압축시험 결과

공번	일축압축강도		
	q_u , kgf/cm ²	q_c , kgf/cm ²	Sensitivity
BH-1	100	98.59	74.5
BH-3	100	89.63	61.76
BH-5	100	97.09	82.51

표 5 삼축압축시험 결과

공번	c, kgf/cm ²	ϕ , deg
BH-1	0.511	0
BH-3	0.448	0
BH-5	0.461	0

3.3 성토침하 계측

3.3.1 계측기 설치 위치

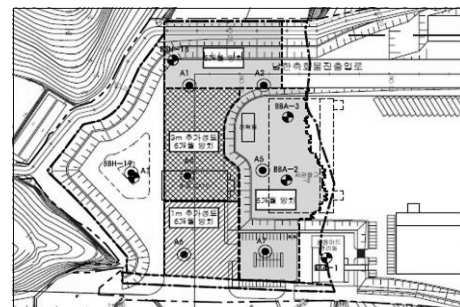


그림 5 계측기 설치 위치

계측기 설치는 그림 5와 같이 하였다.

3.3.2 침하판 침하 계측 자료

표 6 침하판 침하 계측내용

위치	초기 측정일	경과일수	성토고	
A1	2008.08.07	565	12.9	
A2	2008.08.07	565	14.1	
A4	2008.08.07	565	15.3	
A5	2008.08.07	565	17.4	
A6	2008.08.07	565	13.3	
A7	2008.08.07	565	12.1	
위치	누적치(cm)		금월-전월 침하량(cm)	$\Delta s / \Delta t$
	전월	금월		
A1	244.0	245.3	1.30	0.434
A2	234.1	234.1	0.60	0.415
A4	235.9	239.9	4.00	0.425
A5	264.0	266.3	2.30	0.471
A6	283.5	286.7	3.20	0.507
A7	268.6	271.7	3.10	0.481

4. 침하예측 및 분석

4.1 개요

동해선 철도, 도로 출입시설공사에 대해 실시도인 침하예측은 연구대상지역중 6개 구역인 A1, A2, A4, A5, A6, A7구역의 침하자료를 바탕으로 장래침하량 예측 기법인 쌍곡선법, Asaoka법, Hoshino법, \sqrt{s} 법, Monden법을 이용하여 각각의 예측기법에 따라 2008년 8월~2009년 1월까지의 경과시간에 따른 예측침하량을 구하고, 실제침하량과 예측침하량을 비교·검토하였다.

4.2 침하예측

총 계측기간인 2008년 8월부터 2010년 2월까지의 계측 기간 중 2009년 1월까지의 계측데이터를 가지고 A1, A2, A4, A5, A6, A7 구역을 각 기법별로 침하예측을 하였다.

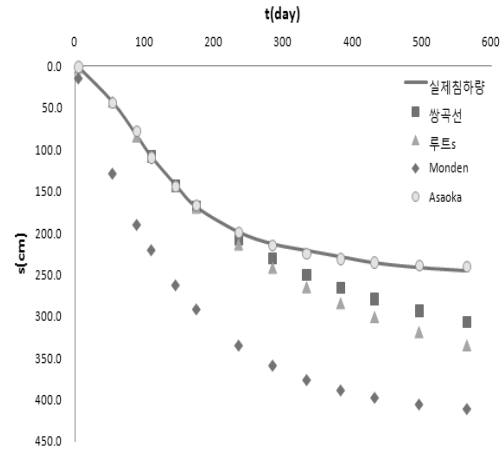


그림 6 침하예측 결과(A1구역)

A1 구역은 Asaoka법의 오차가 -1.87%로 가장 유사하게 분석되었으며, Hoshino법은 압밀도 60%에서는 최적의 직선화 경향을 찾기가 어렵고 직선의 기울기가 압밀시간이 증가함에 따라 수평으로 되어 예측이 불가능 하였다. 나머지 예측기법인 쌍곡선법, \sqrt{s} 법, Monden법은 각각 24.9%, 67.78%, 40.2%로 실제침하량과의 오차 범위가 크게 나타나므로 분석이 되지 않은 것으로 판단된다.

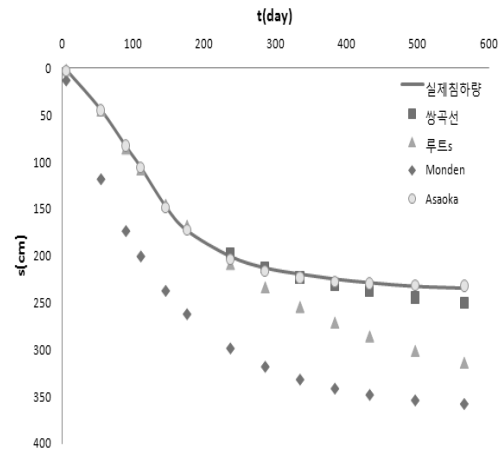


그림 7 침하예측 결과(A2구역)

A2 구역은 Asaoka법의 오차가 -1.24%로 가장 유사하게 분석되었다. 그리고 쌍곡선법은 6.15%의 오차를 보이며 다소 과대하게 측정되었으며 \sqrt{s} 법과 Monden법은 각각 25.21%, 34.45%로 과대하게 분석되었다. 그러나 Hoshino법은 2008년 8월~2009년 1월까지의 예측 자료의 부족으로 침하예측이 되지 않아 결과를 나타낼 수 없었다.

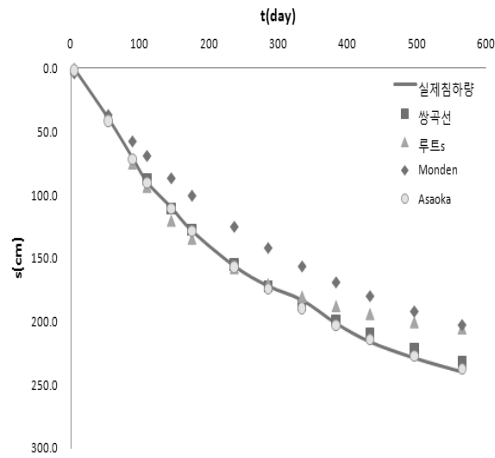


그림 8 침하예측 결과(A4구역)

A4 구역에서는 쌍곡선법이 -3.4%, Asaoka법이 -1.01%로 유사하게 분석되었고, \sqrt{s} 법은 -16.88%의 오차를 Monden법은 -18.27%의 오차를 보이며, Hoshino법은 압밀도가 매우 낮아 분석되지 않는 것으로 나타났다.

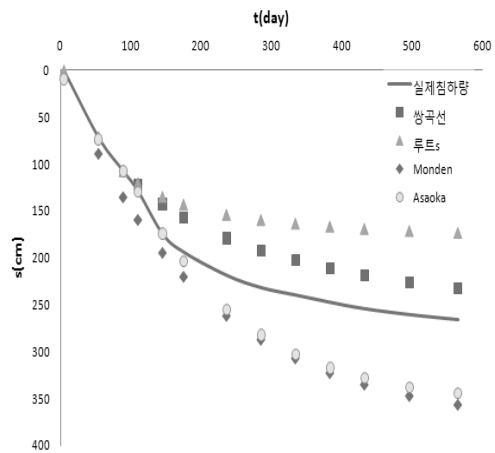


그림 9 침하예측 결과(A5구역)

침하예측 결과 A5 구역에서는 쌍곡선법과 Asaoka법의 오차가 각각 -14.43%, 22.67%가 나왔으며, \sqrt{s} 법과 Monden법 역시 오차가 각각 -54.08%, 29.92%로 차이가 매우 큰 것으로 분석되었다.

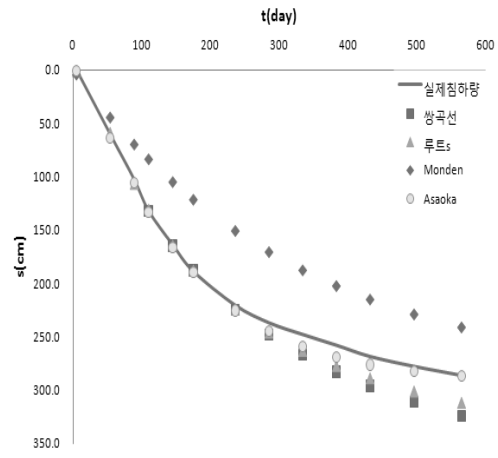


그림 10 침하예측 결과(A6구역)

A6 구역에서는 Asaoka법이 0.02%의 오차를 보이며 가장 잘 부합되게 분석이 되었고, 쌍곡선법, \sqrt{s} 법, Monden법의 오차가 각각 11.53%, 8.18%, 13.32%로 과대하게 분석이 되었다.

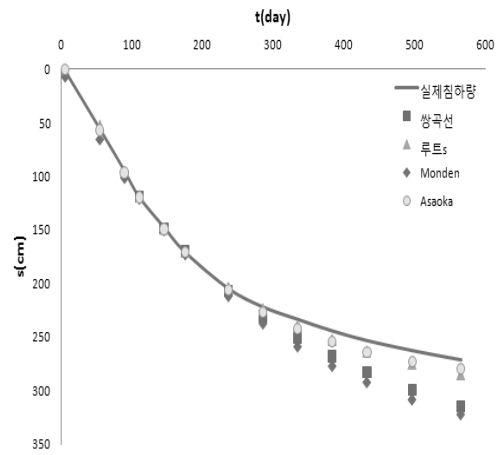


그림 11 침하예측 결과(A7구역)

A7구역 역시 Asaoka법이 2.87%로 가장 잘 부합되게 분석되었으며, \sqrt{s} 법이 4.59%로 다소 근접하게 분석되었다. 반면 쌍곡선법과 Monden법은 13.63%, 15.78%로 과대하게 분석되었다.

표 7 침하예측 결과 요약(2008.8~2009.1)

예측기법		A1	A2	A4	A5	A6	A7
실제침하 (cm)		245.3	234.7	239.9	266.3	286.7	271.7
쌍곡선	침하 (cm)	306.5	250.1	232.0	232.7	324.1	314.6
	오차 (%)	24.94	6.15	-3.40	-14.43	11.53	13.63
Asaoka	침하 (cm)	240.7	231.8	237.4	344.3	286.7	279.7
	오차 (%)	-1.87	1.24	-1.01	22.67	0.02	2.87
Hoshino	침하 (cm)	분석	분석	분석	분석	분석	분석
	오차 (%)	안됨	안됨	안됨	안됨	안됨	안됨
\sqrt{s}	침하 (cm)	334.7	313.8	205.2	172.8	312.3	284.7
	오차 (%)	26.70	25.21	-16.88	-54.08	8.18	4.59
Mondan	침하 (cm)	410.7	358.0	202.8	379.9	330.7	322.6
	오차 (%)	40.27	34.45	-18.27	29.92	13.32	15.78

5. 역해석에 의한 압밀정수 재산정

침하예측자료를 이용하여 각 계측점에 대한 최종 계측시점의 상태를 검토하고, 이를 역해석하여 압밀거동에 주요한 영향을 미치는 압축지수와 압밀계수의 설계지반정수를 재산정하였다. 또한 침하 예측기법 가운데 가장 신뢰성이 높은 쌍곡선법과 Asaoka법을 계측자료 전체에 대하여 적용하고, 이를 평균하여 역해석에 활용하였다.

5.1 침하예측기법에 의한 최종침하 예측

계측자료 결과에 의한 예측침하량의 분석은 쌍곡선법과 Asaoka법에 의한 예상침하곡선과 실제침하곡선이 다른 방법에 비해 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

역해석을 통한 압밀정수 산정은 현재까지의 최종계측자료인 2010년 2월 23일 까지 자료에 쌍곡선법과 Asaoka법을 적용하여 최종침하량을 예측하였다.

현 시점을 기준으로 계획 성토고를 유지한 A1, A2, A5, A7 지역은 압밀도가 92.48~96.66%이며, 추가성토를 한 A4, A6 지역에서는 88.43~89.93%의 압밀도를 보여 압밀도가 약 90% 이상이 됨을 보였다.

이 같은 결과를 바탕으로 역해석을 수행하기 위한 설계지반정수의 재산정을 시행하였다.

표 8 전체 계측결과에 의한 분석

구간	현재 침하량 (cm)	쌍곡선법		Asaoka법		역해석 적용(평균)	
		최종 침하량 (cm)	현재 압밀도 (%)	최종 침하량 (cm)	현재 압밀도 (%)	최종 침하량 (cm)	현재 압밀도 (%)
A1	245.3	276.5	88.62	252.0	97.34	264.3	92.82
A2	234.7	249.8	93.79	235.7	99.58	242.8	96.66
A4	239.9	267.5	88.45	275.0	87.24	271.3	88.43
A5	266.3	282.1	91.24	271.1	98.23	276.6	96.28
A6	286.7	328.3	87.06	309.3	92.69	318.8	89.93
A7	271.7	303.6	86.27	284.0	95.67	293.8	92.48

5.2 설계지반정수 재산정

본 연구대상지역에서 Terzaghi의 1차원 압밀이론(1923)을 적용하여 설계지반정수를 재산정하였다. 시공 전 지반조사 단계에서 분석된 지반정수는 지반조사 시험결과와 평균값을 적용하였으며, 적용된 결과는 압축지수 1.3, 압밀계수 $5.00 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 를 적용하였다.

본 연구에서는 최종침하예측으로 산정된 최종침하량을 적용하여 압축지수를 재산정하였다. 이때 간극비는 지반조사 시 실험자료의 평균값인 6.2를 적용하였다.

표 9 계측자료를 이용한 역해석 결과

구간	역해석 결과		향후 거동 예측		
	압축 지수	압밀 계수 (cm^2/sec)	잔류 침하량 (cm)	압밀도 95% 침하량 (cm)	압밀도 95% 도달 잔여시간 (month)
A1	1.693	1.29×10^{-3}	34.4	241.4	4.5
A2	1.632	1.42×10^{-3}	28.9	235.0	3.4
A4	1.454	1.19×10^{-3}	57.9	227.4	9.9
A5	1.581	1.45×10^{-3}	26.2	251.8	2.6
A6	1.891	1.35×10^{-3}	58.3	289.8	7.4
A7	1.639	1.23×10^{-3}	46.6	264.8	5.8
평균	1.648	1.32×10^{-3}	42.0	251.7	5.6

이러한 결과를 통하여 남은 공사기간을 감안하여 향후 추가 성토가 필요할지, 현재 상태로 유지할지 또는 여성부분을 제거할지 등을 결정할 수 있는 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 유기질토층으로 협재된 고소성 실트질 연약지반에 성토에 의한 침하량을 계측 관리한 결과를 토대로 장래침하량 예측기법인 Hoshino법, Asaoka법, 쌍곡선법, \sqrt{s} 법, Monden법을 이용하여 각각의 예측기법에 따라 경과시간에 따른 예측침하량을 구하고, 실제침하량과 예측침하량을 비교·검토하였으며 역해석 기법을 통하여 압밀정수를 구하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 유기질토의 특성에 대하여 문헌 고찰을 수행하고 연약지반 계측에 관한 사항에 대하여 종합적인 고찰을 실시하였다.

2. 본 연구대상 지역의 예측침하량이 실측 침하량과의 근접성을 보기 위하여 각각의 예측기법에 따라 2008년 8월~2009년 1월의 경과시간에 따른 예측침하량을 구하였다. 그 결과 Asaoka법이 가장 유사한 결과를 보였다.

3. 본 연구의 예측 기법 중 Hoshino법은 분석 범위의 부족으로 예측침하량을 구할 수 없었고, 다른 기법보다 많은 계측자료가 필요함을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 최호광, 이대명, 백승훈, 정성교, “새로운 침하 예측기법 및 적용”, *한국지반공학회*, '97 가을 학술 발표회 논문집, pp. 37 - 47, 1997.
- [2] Arman. A., “Engineering Classification of Organic Soils”, *Highway Research Board, National Research Council*, Highway Research, No. 310, pp. 75~89, 1969.
- [3] Asaoka. A., “Observational Procedure of Settlement Prediction”, *Soils and Foundation*, Vol. 18, No. 4, pp. 87 - 101, 1978.
- [4] Hills. C. I. and Brawner. C. O., “The Compressibility of Peat Reference to Major Highway Construction in British Columbia”, pp. 204 - 227, 1961.
- [5] Mersi. M., “A Coefficient of Secondary Compression”, *Proc. ASCE, SM1*, pp. 123-137, 1973.
- [6] Mersi. M. and Godlewski., “Time and Stress Compressibility Interrelationship”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, pp. 417 - 429, 1977.
- [7] Monden. H., “A New Time Fitting Method

for the Settlement Analysis of Foundation on Soft Clay”, *Memoir Fac. Eng. Horoshima University*, Vol. 12, No. 1, pp. 21, 1936.

- [8] Takenaka and Yasuhara. K., “Engineering Problems of Organic Soils in Japan”, *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Research Committee on Organic Soils. , pp. 35 - 48, 1977.
- [9] Taylor. D. W. and Merchant. W., “A Theory of Clay Consolidation Accounting for Secondary Compression”, *Journal of Mathematics and Physics*, Vol. 17, No 3, pp. 167, 1940.
- [10] Terzaghi. K., “Die Erddrucker Scheinungen in Oestlich Beamsprucken”, *Schuettungen and Die Eutstehung Von Tragkoerpern*, pp. 194 - 199, 1927.
- [11] 大平小谷., “log-log曲線定規壓密沈下-時間關係 整理法”, *土と基礎*, Vol. 17, No. 9, pp. 1~70, 1969.
- [12] 石井精丸他., “沖積粘土の 土學的性質に 關する研究”, *日本土木學會論文集*, No. 30, pp. 1~33, 1955.