

계측결과를 이용한 연약지반상 성토시의 최종침하량예측기법들의 현장적용성 평가 The evaluation of applicability for several final settlement prediction methods to field settlement management by measurement results carried on embankment on the soft clays

김종렬¹⁾, Jong-Ryeol Kim, 강희복²⁾, Hee-Bog Kang, 최주명⁴⁾, Ju-Moung Choi, 황성원³⁾, Soung-Won Hwang, 김우진³⁾, Woo-Jin Kim

- 1) 전남대학교 공과대학 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Chonnam National Univ.
- 2) 한영대학 토목환경과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Hanyeong College.
- 3) 전남대학교 공과대학 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Chonnam National Univ.
- 4) 삼성물산(주) 건설부분 토목기술팀 과장, Manager, Civil Engineering & Tech. Team, Samsung Corporation.

개요(SYNOPSIS) : In this study, we intended to compare and examine several settlement management methods by analyzing measurement results of a site of the industrial complex at ○○ province.

We predicted and analyzed the amount of final settlement by using generally used final settlement methods as like Hyperbola method, Hoshino methods and Asaoka method. And then, We compared the predicted results with that of measurement.

On the basis of comparison of the three methods, Hyperbola method was the most convenient and accurate method of the three methods and if a sufficient time was given enough after embankment construction, the use of Hoshino method was possible. In the case of the Asaoka methods, it was possible to know that it had an approaching tendency to the measured one with increasing time interval spent on analysis.

Therefore, in order to predict settlement behavior more accurately it is needed to understand their advantages and shortcomings sufficiently and pay attention to application to the real site.

주요어(Key words) : settlement, predict, Hyperbola, Hoshino, Asaoka

1. 서론

연약지반상에서 성토의 기본적인 시공법은 성토하중에 따라 지반의 압밀을 진행시켜 전단강도를 크게 하여 단계적으로 성토를 시공하는 것이다. 그래서 성토하중의 증가가 지반의 강도증가와 균형을 이루어

안정 상태에서 시공될 수 있게 하여야 한다. 이러한 성토 구조물에 관리방법으로 안정관리와 침하관리를 병행하여 실시한다. 그 중 침하관리는 일반적으로 연약지반의 각층마다 침하량을 구하여 침하의 진행사항을 조사하거나 이론적인 계산에 의한 침하량의 시간에 따른 변화를 침하관리에 의해 조정하고 시공공정을 수정하며 성토시 성토량과 성토지속기간 및 제거시기 등을 결정하는데 이용되고 있다. 현재 국내에서는 실측치를 이용한 방법 중 쌍곡선법, Hoshino법, Asaoka법 등이 사용되고 있다.

본 연구에서는 ○○지방산업단지 조성공사 개발사업에 실시된 침하계측 결과를 사용하여 실제 지반의 단계 성토 및 방치에 따른 압밀 침하 양상을 파악 할 수 있다. 그리고 이 결과를 현재 보편적으로 사용되고 있는 쌍곡선법, Hoshino법, Asaoka법을 사용하여 연약지반의 장래 침하량을 예측하고 분석함하고자 한다. 이와 같이 분석을 실시함으로써 본 연구에서 얻고자 하는 최종침하량 예측기법의 적용할 때 주의 할 점과 성토에서 분석에 필요한 계측자료의 선택방법 등을 평가하고자 한다.

2. 계측이 실시된 연약지반의 공학적 특성

본 연구의 대상으로는 국내 ○○ 산업단지 조성사업에 있어 부지 조성을 위해 성토를 실시하였다. 본 연구대상 지반의 지형적 특징으로는 해성퇴적지층과 하성퇴적지층이 매우 깊은 심도까지 분포하고 있다. 그래서 연약점토층이 존재하고 있는 구간에 있어 성토를 실시하는 동안 발생 가능한 침하 및 지반 파괴를 관측하기 위해 계측을 실시되었다.

2.1 연약지반의 특징

토질 조사 결과 중 기초지반에 대한 조사 자료를 종합하여 지반의 물리적, 역학적 특성을 분석하고 기초지반의 안정성 검토에 필요한 토질 정수 등의 기초 자료를 분석하자 한다.

표 1. 대상 지반의 흙의 물리적 성질

구분	w(%)	Gs	e	γ_t (t/m ³)	LL (%)	PI (%)	q_u (kg/cm ²)
평균	52.8	2.720	1.514	1.678	57.9	25.8	0.324

2.1.1 전단강도 특성

흙의 전단강도를 측정하는데 있어 일반적으로 현장시험 및 실내시험으로 구분하고 있다. 본 지역의 전단강도는 일축압축시험 결과 0.297~1.061 kg/cm², 삼축압축시험(UU)에서는 0.149~0.531 kg/cm², 삼축압축시험(CU)에서는 0.070~1.20 kg/cm²로 조사되었다.

2.1.2 압밀 특성

(가) 압밀계수(C_v)

압밀계수는 압밀하중이 증가함에 따라 감소하며, 선행 압밀하중을 넘어선 정규압밀하중 영역에서는 거의 일정한 값을 보인다. 본 조사 지역의 압밀계수는 다음과 같은 범위를 보인다.

표 2. 대상 지역의 압밀계수

구분	재 하 하 중 (kg/cm ²)			
	0.4	0.8	1.6	3.2
평균	8.70×10^{-3}	6.13×10^{-3}	3.11×10^{-3}	1.90×10^{-3}

(나) 압축지수(Cc)

본 조사 지역의 압축지수(Cc)의 분포는 0.359~1.046으로 조사 되었으며 심도가 증가됨에 따라 압축 지수가 증가하는 경향을 보여 조사 대상 토층은 하부에서 상대적으로 높은 압축성의 점토가 존재함을 알 수 있다.

2.2 침하예측기법 적용 및 고찰

2.2.1 실제 현장의 계측

현장에서 계측관리를 통한 지표면 침하관 및 층별 침하계의 Data를 비교분석 검토하여 예상되는 최종 침하량, 현재까지의 압밀도, 임의 시점에서의 압밀도, 공용하중 적용시 발생될 잔류침하량을 추정하는 것이 현장토질조건 등이 고려된 정확한 침하분석이 될 것이다. 본 연구에서는 실제 계측된 값을 사용하여 침하분석방법으로 현재 보편적으로 사용되는 쌍곡선법, Hoshino법, Asaoka법에 대해 분석을 실시하고 방법의 적합성과 예측된 침하량 등을 서로 비교 분석하고자 한다.

본 연구에 대상 지역인 SP-3와 SP-4는 단계성토를 실시하였으며 성토 기간과 성토고는 다음 표 8과 같다. 그리고 이 지역에 대응되는 실제계측결과와 성토고의 관계를 그림 1에 나타내었으며 이를 살펴보면 최종 침하량이 SP-3에서는 153.7cm 그리고 SP-4는 52.7cm로 계측되었다.

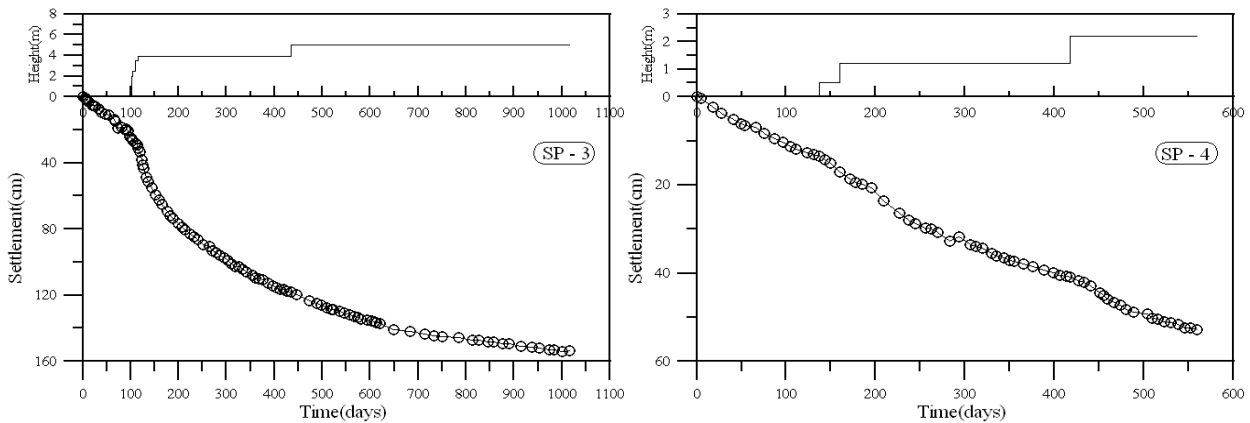


그림 1 단계성토에 따른 실측 침하량

표 3. 지점별 단계 성토고와 성토완료기간

구 분	SP-3		SP-4	
	성토고 (m)	완료기간 (days)	성토고 (m)	완료기간 (days)
1 단계	2.0	102	0.5	137
2 단계	2.5	104	1.2	160
3 단계	3.5	110	2.2	417
4 단계	3.9	116		
5 단계	5.0	447		

3. 침하예측기법에 따른 분석

현장에서 계측관리를 통한 지표면 침하관 및 층별 침하계의 Data를 비교분석 검토하여 예상되는 최종 침하량예측, 즉 침하분석에 쌍곡선법, Hoshino법, Asaoka법을 이용하였다.

본 연구에서는 대상 지역을 SP-3와 SP-4로 선정하고 각 성토 단계별로 분석을 실시하였으며 다음과 같이 나타내었다. 또한 다음 표 4는 각 지점에 대한 최종 침하량을 실측한 값이다. <()의 값은 모래층의 즉시 침하량 값임.>

표 4. 각 지점별 실제 관측된 최종침하량

지점	성토 종료후 경과시간(days)	최종침하량(cm)
SP - 3	1023	141.4(29.6)
SP - 4	658	95.3(15.6)

3.1 쌍곡선법(Hyperbolic methods)

쌍곡선법은 앞 절에서 설명한 바와 같이 침하의 평균속도가 쌍곡선적으로 감소한다.”는 가정하에 초기의 실측침하량으로부터 장래의 침하량을 예측하는 방법으로 침하예측의 Model식은 다음과 같다.

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

- 여기에서 S_t : 성토종료 경과시간 t 에서의 침하량
- S_o : 성토종료 직후의 침하량
- t : 성토종료 시점으로부터의 경과시간
- α, β : 실측침하량 값으로부터 구한 계수

이러한 방법으로 계측된 실제 계측값을 사용하여 단계성토에 따라 4단계로 구분하고 이에 대해 분석을 실시한 결과를 살펴보면 다음과 같다.

먼저 SP-3 지점을 살펴보면 최종 성토 이후 예측된 결과를 살펴보면 169.37cm로 실제 발생된 침하량 141.4cm보다 큰 값을 보이고 있다. 이는 최종 성토 이후 658일이 경과된 계측된 침하량으로 이후 침하가 0.6cm정도 더 발생한 것이지만 모래층의 즉시압밀침하량 29.6cm를 포함하고 있는 값으로 이 값은 2차 압밀 침하까지 포함 된 것으로 판단하였다. 또한 SP-4 지점을 살펴보면 역시 85.85cm로 실제 발생된 침하량 95.3cm보다 작은 값을 보이고 있다. 이는 최종 성토 이후 253일이 경과된 계측된 침하량으로 이후 침하가 10.55cm정도 더 발생하였다. 종합해 보면 성토가 단계적으로 진행되고 있는 경우에는 종래의 성토에 의한 침하가 내포되어 침하가 발생하고 있어 예측에 있어서 부정확한 결과를 가져왔다. 하지만 최종 성토가 실시된 이후 방치 기간이 되면 경과되면 가까워지는 경향을 보인다. 그래서 회귀직선을 결정함에 있어서는 후반부의 직선부분을 주목함이 바람직할 것으로 판단된다. 그리고 data의 처리가 간단하고 예측정도가 높으며 예측 가능시기 역시 빠르다고 판단된다.

표 5. 쌍곡선법에 의한 최종침하량 예측결과

구분	계 수		초기 침하량	최종침하량
	α	β	S_i	S_f
SP-3	10.837	0.035	140.8	169.37
SP-4	7.160	0.022	40.6	85.85

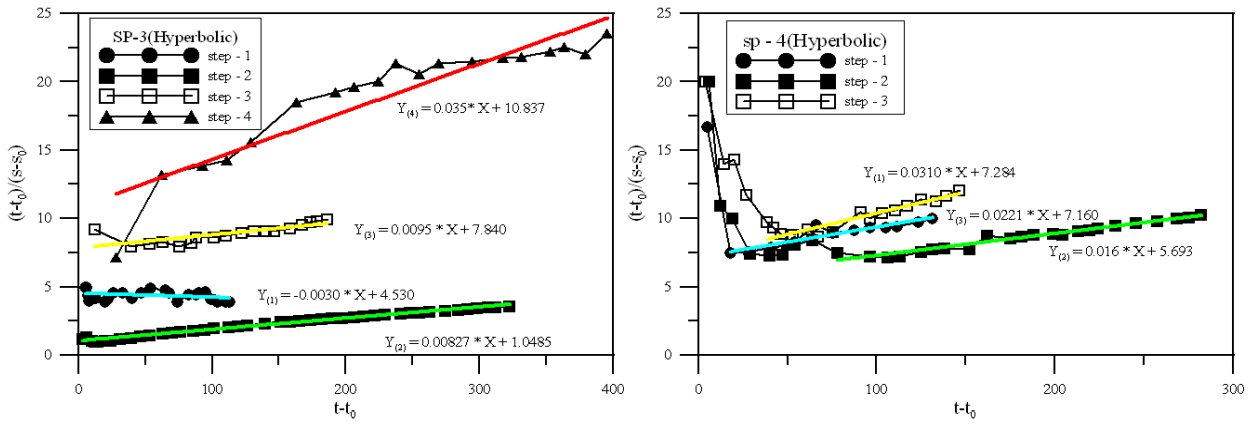


그림 15. 쌍곡선법에 의한 SP-3지역의 계측 Data 분석(전체)

3.2 Hoshino법(\sqrt{t} 법)

침하의 시간적 경과에 대해서 Terzaghi의 압밀이론에 의하면 초기침하는 시간의 평방근에 비례한다는 기본 원리에서 장래침하량을 예측하는 법으로 침하예측의 관계식은 다음과 같다.

$$S_t = S_i + S_d = S_i + \frac{A \cdot K \cdot \sqrt{t}}{\sqrt{1 + K^2 \cdot t}} \quad (3)$$

여기서, S_i : 성토종료 직후의 침하량
 S_d : 시간의 경과와 더불어 증가하는 침하량
 A, K : 실측침하량 값으로부터 구한 계수

최종침하량(S_f)

$$S_f = S_i + A \quad (4)$$

다음은 Hoshino방법으로 계측된 실제 계측값을 사용하여 분석을 실시한 결과를 살펴보면 다음과 같다. 먼저 SP - 3 지점의 경우를 살펴보면 모든 구간에서 예측이 불가능하였다. 이는 Hoshino 계수 중 회귀곡선의 기울기, β 가 음수(-)값을 보여서 계산이 불가능하였다. 이러한 요인은 y축의 값이 $(s_t - s_0)^2$ 의 값으로 침하량의 차이가 작으면 매우 미소한 값을 나타내게 되므로 회귀식의 예측정도가 매우 변화가 심하게 발생하게 된다. 그래서 이러한 결과가 발생한 것으로 판단된다. 다음으로 SP - 4 지점의 결과를 살펴보면 1단계에서 예측된 침하량은 8.06cm, 2단계에서 44.72cm, 3단계 성토 즉, 최종 성토이후 예측된 침하량은 52.15cm로 실제 침하량 95.3cm의 54.7%정도의 값을 나타내었다.

이러한 결과를 종합해 볼 때 Hoshino법의 경우에는(S_i, t_i)의 선정방법에 따라 예측정도가 많이 변화한다. 일반적으로 실측침하의 시간에 따른 변화도를 수정하여 즉시 침하에 대한 시간을 t_i 로 하고 이에 대응하는 S_i 를 적당하게 가정하여 직선성이 좋은 것을 회귀직선의 분석에 이용한다. 이 방법에 의한 예측침하량도 쌍곡선법과 마찬가지로 시간이 경과함에 따라 실측치에 근접한다.

표 6. Hoshino법에 의한 최종단계성토의 침하량 예측결과

Site	계수				초기	최종
	a	β	A	K	S_i	S_f
SP-3	2.354	-0.0026	-	-	136.9	-
SP-4	1.913	0.0075	11.547	0.0626	40.6	52.147

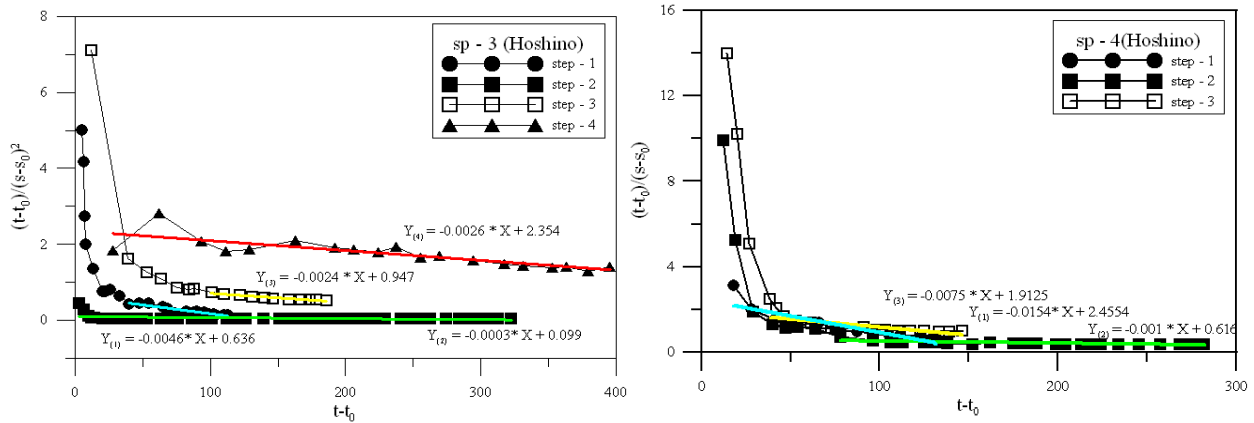


그림 3. Hoshino법에 의한 SP-3지역의 계측 Data 분석(전체)

3.3 Asaoka법

Asaoka는 1차원 압밀방정식에 의거 하중이 일정할 때의 침하량을 나타내는 간편식으로 다음과 같은 관계식을 사용하였다.

$$S_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot S_{i-1} \quad (5)$$

여기서, S_i : 시간 t 를 이산화하여 $t_i = t \times i$ ($i = 1, 2, 3, 4, \dots$)일 때 시간 t_i 에서의 침하량

S_{i-1} : 시간 $t_{i-1} = \Delta t \times (i-1)$ 에서의 침하량

β_0, β_1 : 실측침하량으로 구한 계수

최종침하량(S_f)

$$S_f = \frac{\beta_0}{1 - \beta_1} \quad (6)$$

Asaoka법에서 예측된 침하량은 계측된 결과를 시간간격(Δt)을 30일, 50일, 100일로 나누어 분석을 실시하였다. 이러한 결과를 실제 침하량과 비교했을 때 예측침하량은 실측치보다 작게 예측되며 시간이 경과함에 따라 실측치에 근접한다. ($S_i \sim S_{i-1}$)관계를 좌표상에 Plot하면 반드시 직선이 되지 않는으므로 회귀직선을 결정할 때에는 쌍곡선법과 마찬가지로 data의 후반부에 주목하는 것이 좋다. 이러한 성질을 이용하여 Δt 의 크기를 각 경우에 알맞게 변화시키면서 이용하는 것이 좋다고 판단된다. 특히 압밀의 최종단계에 있어서 Δt 기간 중의 침하량 ΔS 가 작을 경우에는 그림 상에 Plot한 점은 $S_i = S_{i-1}$ 의 선상에 접근하는 모양을 보이므로 Δt 를 길게 잡는 방법이 효력을 발휘한다.

표 7. Asaoka법에 의한 최종 침하량 예측결과

구분	30일 간격			50일 간격			100일 간격		
	계수		침하량	계수		침하량	계수		침하량
	β_1	β_0	S_f	β_1	β_0	S_f	β_1	β_0	S_f
SP-3	0.995	1.796	359.28	0.836	25.920	157.57	0.625	57.102	152.31
SP-4	0.995	1.435	287.00	0.981	1.435	82.34	0.917	6.817	72.05

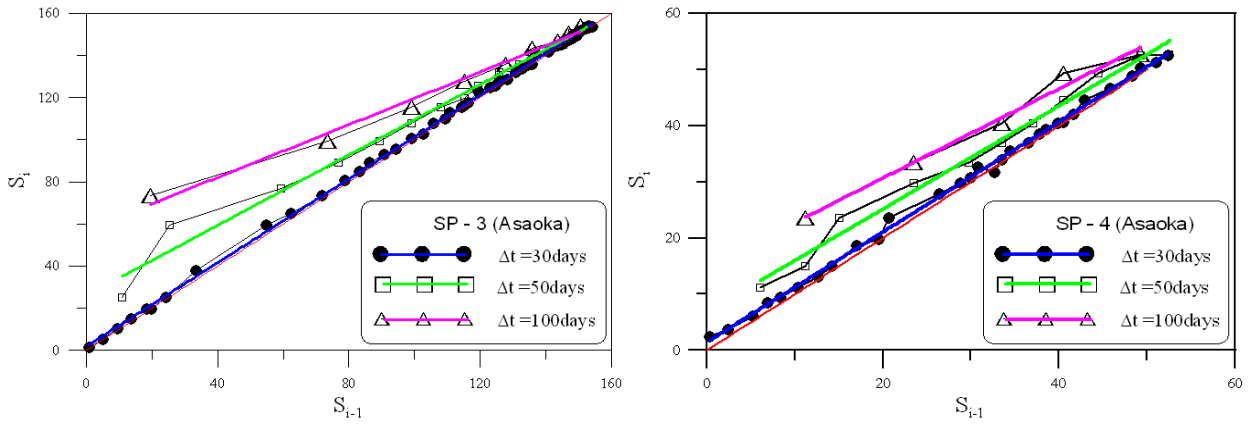


그림 4 Asaoka법에 의한 SP-3지역의 계측 Data 분석(50일 간격)

3.4 현장 계측 결과의 최종침하량예측기법의 적용성에 대한 분석

이러한 최종침하예측법인 쌍곡선법, Hoshino법, Asaoka법을 사용하여 분석을 실시한 결과는 다음과 같다. SP-3의 경우 Hoshino법의 경우 계산이 불가 하였으며 쌍곡선법은 실제 침하량보다 약간 크게 평가되고 있다. 또한 Asaoka법은 실제 측정된 침하량에 을 모두 비교해 볼 때 50일 간격, 100일 간격의 경우에 약간 작은 값을 보이고 있다. 이를 표 8에 나타내었다. 또한 표 8에 나타낸 SP-4의 경우를 살펴보면 쌍곡선법과 Asaoka법의 50일, 100일 간격의 분석결과는 실제 침하량보다 약간 작은 값을 나타내고 있다. 이상의 결과를 종합해 보면 쌍곡선법의 경우 가장 간편하고 예측에 있어 비교적 정확한 값을 보이고 있으며 상부 모래층의 탄성침하를 제외한다면 약간 큰 값을 예측 하는 것으로 평가되었다. 이는 종래의 쌍곡선법은 2차 압밀효과를 고려하고 있다고 평가되는 결과와 부합한 것으로 판단된다. 그리고 Hoshino법의 경우 단계 성토기간동안의 결과를 사용하여 분석을 실시한 경우 예측이 거의 불가능 하였으며 최종 단계 즉, 성토가 완료되고 방치기간에 도달된 이후의 거동은 예측가능 하였으며 실제 값에 접근하는 것으로 평가되었다. 또한 Asaoka법의 경우 가장 중요한 부분은 시간 증분을 결정하는 방법이 장래 침하를 예측에 기대한 영향을 주는 것으로 판단되었다. 본 연구에서는 시간증분이 50일, 100일인 경우 적절한 예측값을 나타내었다.

표 8. SP - 3 구간의 예측기법에 따른 예측침하량

구분	쌍곡선법	Hoshino법	Asaoka법			실측최종침하량 (5년 경과)
			30일	50일	100일	
SP - 3	169.37	계산불가	359.27	157.57	152.31	141.4
SP - 4	85.85	52.15	287.00	82.34	72.05	95.3

4. 결론

본 연구에서 ○○지방 산업단지 조성사업에서 실시된 계측결과를 사용하여 장래 침하량을 예측하였다. 현재 보편적으로 사용되고 있는 장래 침하예측기법은 쌍곡선법, Hoshion법(\sqrt{t} 법), Asaoka법 등이 있다. 이를 적용하여 현장 계측 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 쌍곡선법

최종 성토가 실시된 이후 방치 기간이 되면 경과되면 실제 값에 가까워지는 경향을 보인다. 그래서 회귀직선을 결정함에 있어서는 후반부의 직선부분을 주목함이 바람직할 것으로 판단된다. 그리고 data

의 처리가 간단하고 예측정도가 높으며 예측 가능시기 역시 빠르다고 판단된다.

(2) Hoshino법

Hoshino법의 경우에는 (S_i, t_i) 의 선정방법에 따라 예측정도가 많이 변화한다. 일반적으로 실측침하의 시간에 따른 변화도를 수정하여 즉시 침하에 대한 시간을 t_i 로 하고 이에 대응하는 S_i 를 적당하게 가정하여 직선성이 좋은 것을 회귀직선의 분석에 이용한다. 이 방법에 의한 예측침하량도 쌍곡선법과 마찬가지로 시간이 경과함에 따라 실측치에 근접한다.

(3) Asaoka법

마지막으로 Asaoka법으로 예측된 침하량은 계측된 결과를 시간간격(Δt)을 30일, 50일, 100일로 나누어 분석을 실시하였다. 이러한 결과를 시간 간격이 커질수록 실제 침하량과 비교했을 때 예측침하량은 시간이 경과함에 따라 실측치에 근접한다.

이와 같은 결과를 살펴볼 때 현재 사용되고 있는 장래침하예측기법의 사용에 있어 쌍곡선법의 사용이 가장 손쉽게 사용될 수 있었으며, Hoshino법의 경우 최종단계 즉, 성토 완료 후 방치기간이 충분한 경우에 사용가능하였다. 또한 Asaoka법은 분석에 사용되는 시간간격을 충분히 주었을 때 실측값에 근접함을 알 수 있다. 이러한 현재 사용되고 있는 장래침하예측기법의 장·단점을 충분히 분석한 후 실제 현장 적용에 있어 많은 주의를 해야 실제에 가까운 판단을 할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김성환, 조성민(1999), “연약지반상 도로성토의 시공과 관리”, 한국도로공사연구소, pp.206~216.
2. 김수삼, 김학문(1996), “연약지반”, 연약지반의 시공관리 사례, 한국지반공학회.
3. 대한토목학회(1999), “신호지방산업단지 과대 침하의 원인분석을 위한 기초적인 연구”.
4. 박광준(1994), “지반계측”, 정보화시공위원회 학술발표집 제1집, pp. 54~69.
5. 부산광역시 건설본부(2002), “신호지방산업단지 개발산업 침하계측관리용역 종합보고서”.
6. 이문수, 김영남(1996), “연약지반(VII)”, 한국지반공학회지, Vol.12, No.5, pp. 155~173.
7. 토목기술강좌 토목시공-지반분야(I)(1999), 대한토목학회, VOL.4 NO.1, pp. 299~340.
8. 한국지반공학회(2001), “정보화 시공”, 지반공학 시리즈 12, pp. 327~383.
9. 한국토지공사(1997), “연약지반의 처리공법과 침하계측에 관한 연구”,
10. 日本土質工學會(1989), "軟弱地盤對策公法-調査設計から施工まで", pp. 351~372.
11. J. Dunnycliff(1993), Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. WILEY INTERSCIENCE, pp. 33~44.
12. K. Terzaghi, R.B. Peck, G. Mesri(1995), Soil Mechanics in Engineering Practice, WILEY INTERSCIENCE, pp. 106~122.
13. T. H. Hanna(1985), Field Instrumentation in Geotechnical Engineering, Trans Tech Publication, Clausthal.