

단계성토 시 쌍곡선법의 개선된 해석방법

장석명¹ · 한희수^{2*}

¹한국도로공사 충북본부 본부장, ²국립금오공과대학교 토목공학과 교수

Modification of the Hyperbolic Method for Staged Fill

Suk-Myung Jang¹ · Heui-Soo Han^{2*}

¹Director of the Headquarters, Korea Expressway Corporation

²Professor, Kumoh National Institute of Technology

Abstract

The purpose of settlement management when treating soft ground through preloading is to determine the amount of settlement, check the progression of consolidation, and compare the settlement with the target settlement amount. Of the various methods available for predicting settlement based on measured data, the hyperbolic method was used in this study to analyze the settlement behavior of soft ground considering the creep behavior resulting from staged fill. Two versions of the method were used: the existing hyperbolic method, and a modified hyperbolic method. The existing hyperbolic method predicts the settlement amount using data for the final settlement section only during soft ground treatment through staged fill, for which the coefficient of consolidation behavior (k) was computed to give a predicted final consolidation settlement amount of $S_r = 1.05$ cm. In comparison, using the modified method, a predicted final consolidation settlement of $S_r = 0.50$ cm is obtained by considering the data for each staged fill section. These results show that the modified method considering data from the staged settlement was more accurate than the existing method considering data only from the final settlement section. This modification to the hyperbolic method therefore represents an improvement in performance over the existing method.

Keywords: hyperbolic method, creep, settlement, staged fill, soft ground

초 록

Preloading을 통한 연약지반처리를 할 때 침하관리는 침하량을 구하고 압밀의 진행상황을 확인하여 이를 실측침하량과 비교·분석하여 preloading의 방치기간, 철거시기, 여성토의 결정 등을 확인하는 것을 목적으로 한다. 침하관리를 위해서는 침하량을 예측해야 하는데 실측 data를 기반으로 침하량을 예측하는 방법 중 쌍곡선법을 이용하여 단계성토로 인한 creep 거동을 고려한 연약지반 침하거동해석을 실시하였다. 기존의 쌍곡선법은 단계성토를 통한 연약지반처리 시 최종침하구간의 data만을 통해 침하량을 예측하였으나, 본 논문에서는 각 단계성토의 침하거동을 해석하고 단계성토에 따른 creep 거동 및 초기탄성침하를 고려하여 압밀거동계수(k)를 제시 및 최종압밀침하량을 예측하였다. 단계성토의 침하거동을 고려한 최종압밀침하량 예측결과, 기존의 최종침하구간의 data만 고려하여 예측한 최종압밀침하량($S_r = 1.05$ cm)보다 각 단계성토별 α , β 값을 통하여 예측한 최종압밀침하량($S_r = 0.50$ cm)이 더 정확한 값을 예측하였다.

주요어: 쌍곡선법, 크리프, 침하, 단계성토, 연약지반

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Heui-Soo Han
E-mail: hanhs@kumoh.ac.kr

Received: 8 November, 2022
Accepted: 23 November, 2022

© 2022 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

Preloading을 통한 연약지반처리를 할 때 침하관리는 가장 중요한 요소이다. 침하관리는 침하량을 구하고 압밀의 진행 상황을 확인하고 이를 실측침하량과 비교·분석하여 Preloading의 방치기간, 철거시기, 여성토의 결정 등을 확인하는데 그 목적이 있다. 이를 위해서는 침하량을 예측해야 하는데 실측 data를 기반으로 침하량을 예측하는 방법은 대표적으로 쌍곡선법(Tan et al., 1991), Hoshino법(Hoshno, 1962), Asaoka법(Asaoka, 1978) 등이 있다. 대부분의 Preloading은 단계식 성토로 시공되며, 이로 인해 creep 거동은 불가피하다. 그러나 이에 대한 고려는 이루어지지 않고 있다. Park은 남해안 모래를 이용하여 장기 creep 침하 특성에 관한 연구를 실시하여 상대밀도에 따라 4.7~11.0%의 creep 침하가 발생한 것을 밝혀냈다(Park, 2018). 또한, Ladd et al.(1977)이 제안한 압밀시험과 Yin and Graham(1996)의 탄-점-소성 모델을 이용하여 1차압밀 중의 침하-시간관계에 대한 creep 영향을 연구하였다(Back et al., 2008).

쌍곡선법의 연구동향을 살펴보면 쌍곡선법의 기본가정식의 선형성 문제를 해결하기 위해 선형구간을 확장한 수정된 쌍곡선법이 연구되었다(Yoo and Kim, 2000). 이후, 쌍곡선법을 이용한 침하거동예측의 최적화를 위해 계측data의 회귀 분석을 통하여 쌍곡선 계수를 결정하는 연구가 이루어졌다(Choo et al., 2010). 또한, 단계성토 시 성토고가 변화됨을 고려하여 가정조건을 기반으로 역해석하여 새로운 침하예측기법을 제안하였다(Chun et al., 2011).

본 논문에서는 creep 거동의 중요성과 쌍곡선법의 초기 creep 거동을 고려하지 못하는 한계를 고려하여 연약지반에 단계성토 Preloading 시 creep 거동을 고려한 개선된 쌍곡선법을 단계성토별 침하곡선에 적용하고 이를 기존의 쌍곡선법 예측결과와 비교분석하였다.

연약지반 침하거동

Creep 거동

Creep은 일정한 하중 하에 시간이 증가함에 따라 변위가 증가하는 현상($\Delta\sigma = 0, \Delta t \uparrow; \Delta\epsilon \uparrow$)으로, 일정한 하중 및 creep 진행시간을 결정하는 것이 creep을 결정하는 중요한 요소이다(Jeon and Han, 2021).

Creep 거동은 Fig. 1과 같이 시간에 따른 변형률로 나타낼 수 있다. x축은 시간(t), y축 변형률(ϵ)을 의미한다. 흙의 creep 단계는 시간에 비례하여 변형률이 연속적으로 감소하며 A시점에 도달했을 때, Transient creep (1차 creep)이 발생, steady-state 상태로 진행되며(2차 creep) 변형률 속도가 증가하여 파괴시점 B에 이르는 Tertiary 양상(3차 creep)으로 진행된다 (Fig. 1). 성토하중으로 인한 시간 의존적 creep은 잔류변위에 영향을 끼치며 이는 곧 예측침하량의 영향이 있음을 시사한다. 그러므로 연약지반 침하거동에는 creep 거동을 반드시 고려해야 한다.

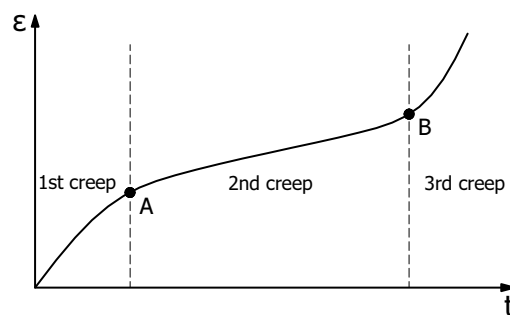


Fig. 1. Creep behavior of soil.

쌍곡선법

연약지반 상에 단계성토를 통한 압밀처리 시 계측data를 통해 예상침하량을 예측하고 있다. 쌍곡선법은 다른 방법들에 비해 압밀도가 낮을 때에도 예측이 가능하며 침하량 내 2차 압밀침하가 포함되어 있어 예측치가 실측치와 잘 대응되는 특징이 있다. 그러나 최종침하단계에서의 data만으로 장래침하량을 예측하기 때문에 Fig. 1과 같이 실제 거동과는 다소 차이가 있다. 기존의 쌍곡선법의 기본식은 식 (1)과 같다.

$$S_t = S_0 + \frac{\Delta t}{\alpha + \beta \Delta t} \tag{1}$$

위 기본식에서 α , β 는 실측침하량으로부터 구하는 계수값이며 Fig. 2에 나타내었다.

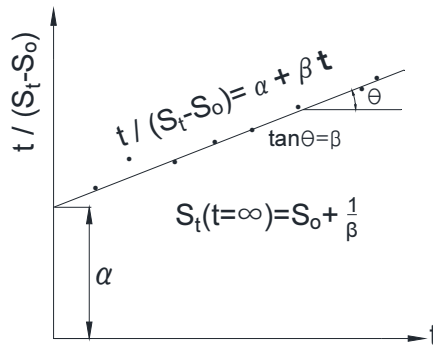


Fig. 2. Coefficient calculation diagram of the hyperbolic method.

본 논문에서 사용한 쌍곡선법을 통해 예측한 침하량의 정확도 계산은 식 (2)와 같다.

$$Accuracy = \frac{S_t}{S_{f(hyper)} \text{ or } S_{t(hyper)}} \times 100 (\%) \tag{2}$$

여기서, S_t : 계측된 최종압밀침하량, $S_{f(hyper)}$: 예측최종압밀침하량, $S_{t(hyper)}$: 압밀경과시간에 따른 예측침하량이다.

기존의 쌍곡선법은 압밀이 70~80% 이상으로 상당히 진행된 시점의 계측 data만을 이용한 값으로 각 단계성토구간의 creep 거동을 고려하지 않고 있다.

이에 본 논문에서는 단계성토에 따른 α , β 값 및 creep 거동을 고려하기 위한 압밀거동변화계수, k를 제안하였다.

각 단계성토 별 침하량을 예측하기 위해, 단계별로 일반화하여 수정된 쌍곡선법의 기본식은 식 (3)과 같다.

$$S_{ti} = S_{0i-1} + \frac{\Delta t_i}{\alpha_i + \beta_i \Delta t_i} \tag{3}$$

여기서, i 는 단계성토의 단계횟수를 의미한다.

단계성토 및 지반거동변화를 나타내기 위해 압밀거동변화계수 k_α, k_β 를 제안하여 쌍곡선법의 계수인 α, β 의 계수로 이용할 계획이다.

1단계 성토 시 기존의 쌍곡선법의 기본식인 식 (1)과 같다. 2단계 성토 시 α_2, β_2 로 계수가 바뀌며 이 계수들은 다음 식 (4), 식 (5)와 같이 일반화하여 표현할 수 있다.

$$\alpha_i = k_{\alpha i-1} \cdot \alpha_{i-1} \quad (i \geq 1) \tag{4}$$

$$\beta_i = k_{\beta i-1} \cdot \beta_{i-1} \quad (i \geq 1) \tag{5}$$

여기서, i 는 단계성토의 성토횟수, k 는 압밀거동변화계수이다.

Creep 거동을 고려한 쌍곡선법

본 연구를 위해 00 현장에서 Preloading을 통한 침하량을 예측하여 creep 거동을 고려한 쌍곡선법을 통하여 해석하였다. 해당 현장은 262일 간 3단계성토를 최종성토고 6.13 m로 진행하였다. Preloading 지반정수는 Table 1과 같다. 단계성토별 성토하중은 Table 2와 같다.

Table 1. Preloading material properties

Classification	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Inner friction (°)
Preloading embankment	19	10	25

연구대상의 단계성토별 침하 및 성토조건을 모사하고자 성토고에 따른 단계성토를 구분을 Fig. 3과 같이 나타내었으며 단계성토에 따른 실제 침하곡선그래프는 Fig. 4와 같이 구분하였다.

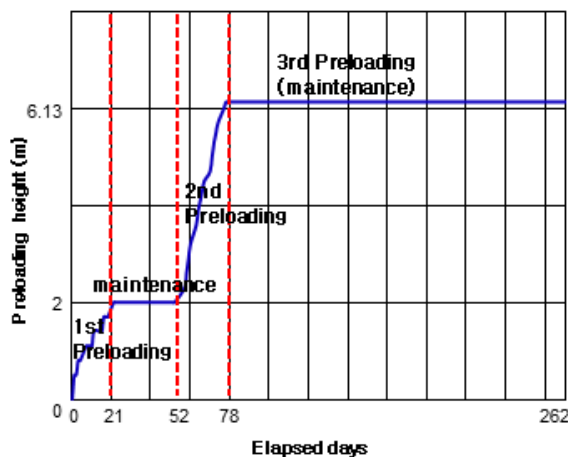


Fig. 3. Preloading height by staged fill.

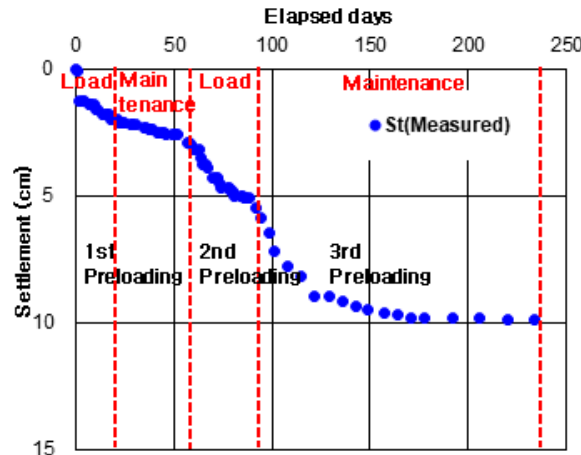


Fig. 4. Settlement curve over time for each staged fill.

1단계성토는 2 m까지 성토하중증가(0~21일) 후, 유지(21~52일)과정을 거쳤으며, 3단계 성토과정은 4.13 m 성토고를 증가시켜 최종 6.13 m의 성토고가 되게 하였다. 이후 3단계성토는 6.13 m의 성토고 유지로 구분하였다.

경과시간에 따른 성토고를 나타낸 Fig. 3과 시간에 따른 계측된 침하량($S_t (Measured)$)을 바탕으로 경과시간에 따른 침하량곡선을 나타낸 Fig. 4에 보인 바와 같이, 2 m 성토재하 후 유지기간이 21~52일 사이로 짧으며, 상대적으로 낮은 성토고(2 m)로 인하여 침하량 변화가 큰 차이가 없었다. 그러므로 0~52일 사이의 기간을 1단계로 정하였다. 2단계는 상대적으로 높은 추가 성토고인 5.13 m 시공에 의해 계측 침하량이 52~78일 사이에 큰 변화를 보여 2단계로 정하였다. 그 후 장기간에 걸친 성토재하기간(78일 이후)은 3단계로 정하였다.

단계성토별 하중증가량은 1단계성토는 2 m 성토하여 38 kN/m², 2단계성토는 4.13 m 추가성토하여 78.5 kN/m², 3단계성토는 최종성토고 유지하여 0이며 이는 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Stress increment by staged fill.

	1st preloading	2nd preloading	3rd preloading
Stress increment	38 kN/m ²	78.5 kN/m ²	0 (maintenance)

기존의 쌍곡선법을 이용한 침하예측곡선은 Fig. 5와 같다. Fig. 5의 빨간 그래프는 쌍곡선법을 통해 예측한 침하곡선($S_t (Hyperbolic)$)이고, 파란 그래프는 계측된 침하곡선($S_t (Measured)$)이다. 성토단계별 침하예측곡선이 구분되지 않아, 쌍곡선법으로 예측한 data와 계측 data간의 그래프 형태가 크게 차이남을 확인할 수 있다(Fig. 5a 참조). 쌍곡선법을 이용한 예측곡선은 초기에 거의 일치하지 않고 2단계성토구간에서 과다하게 예측되며 점차 최종침하구간에서 비슷한 거동으로 수렴하게 예측되었다(Fig. 5a 참조). 침하량을 예측하기 위해 70~80% 이상 압밀된 구간의 계측 data (Fig. 5a 점선 참조)를 기반으로 α , β 값을 구한 $t/(S_t - S_0) - t$ 그래프는 Fig. 5b에 나타내었다. 일부 구간(70~80% 이상 압밀된 구간)의 계측 data를 이용하여 계수를 획득하기 위한 추세식을 나타낸 결과, 매우 높은 결정계수($R^2 = 0.9920$)로 높은 예측정확도를 나타냈다. 그러나 각 단계성토에 따른 거동변화를 고려하지 않아 압밀도가 낮은 시점에서 예측치가 계측 data와 많은 차이를 보이는 것으로 나타났다(Fig. 5a 참조). 이는 쌍곡선법의 특징인 초기침하량을 고려한 모델이나 각 단계성토의 거동은 고려하지 않고 최종침하구간(3단계성토구간)의 값을 통한 α , β 값을 사용하였기 때문이다(Fig. 5a 점선 참조).

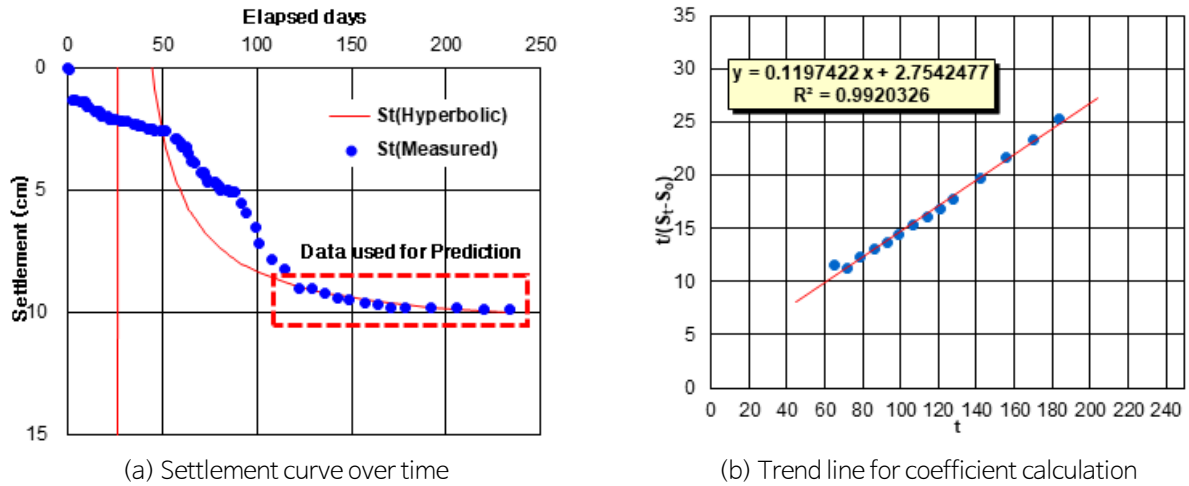


Fig. 5. Settlement prediction result through hyperbolic method using final settlement data.

전체 구간의 data를 고려하여 산정한 α , β 값을 사용한 침하예측곡선은 Fig. 6a에 나타내었다. 전체구간의 data를 기반으로 α , β 값을 구한 $t/(S_t - S_0) - t$ 그래프는 Fig. 6b에 나타내었다. 이때의 α , β 값을 통해 예측한 침하예측곡선은 상대적으로 압밀이 낮게 진행된 초기 구간에서의 예측정확도는 높았으나 압밀이 높아지면서 예측곡선의 정확도는 떨어지는 양상을 보였다(Fig. 6a 참조).

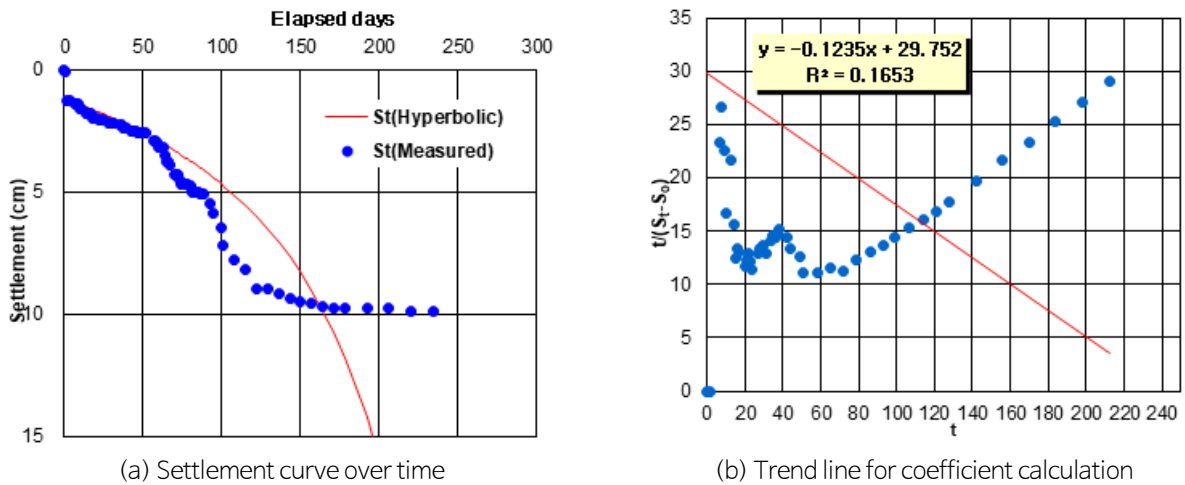


Fig. 6. Settlement prediction result through hyperbolic method using entire settlement data.

본 논문에서는 Fig. 5와 같이 높은 결정계수(R^2)를 위해 최종침하구간의 data만 사용하여 초기침하량을 고려하지 못한 예측값이 산정되는 오류를 해결하기 위해 각 단계성토별 구간을 구분하고, 각 구간의 전체 data를 기반으로 쌍곡선법을 적용 및 해석하였다.

Fig. 2와 같이 α , β 값은 실측data를 기반으로 일차식을 통하여 산정하지만 단계성토로 인한 실제침하 data의 양상은 Fig. 4와 같이 1차 직선식의 형태가 아니며 이로 인해 예측값도 불일치하게 된다. 이러한 기존의 쌍곡선법의 한계를 해결하기 위해 식 (4)의 압밀거동변화계수(k)를 이용하여 침하거동을 해석하였다. 하중단계별로 침하량거동분석을 하면, 명확한

공학적 기준없이 curve fitting을 위해 임의로 선택한 data의 추세선인 Fig. 5b가 제시할 수 없는 압밀과정의 지반거동변화를 해석할 수 있다.

해석방법은 1단계성토에서는 탄성침하구간을 S_{01} 로 설정하고 1단계성토가 끝나는 구간의 침하량을 S_{t1} 로 설정하였다. 이와 같은 방법으로 해석하여 α , β 값을 구하기 위한 $t/(S_t - S_0) - t$ 그래프와 이 때 α , β 값으로 예측한 침하예측곡선은 Fig. 7a and 7b에 나타내었다. 2단계성토에서는 1단계성토가 이미 끝났기 때문에 탄성침하는 미약하게 발생하므로 이를 무시하여 첫 계측지점의 침하량을 S_{02} 로 설정하고 2단계 성토가 끝나는 구간의 침하량을 S_{t2} 로 설정하였다. 이 때 α , β 값을 구하기 위한 $t/(S_t - S_0) - t$ 그래프와 이 때 α , β 값으로 예측한 침하예측곡선은 Fig. 8a and 8b에 나타내었다.

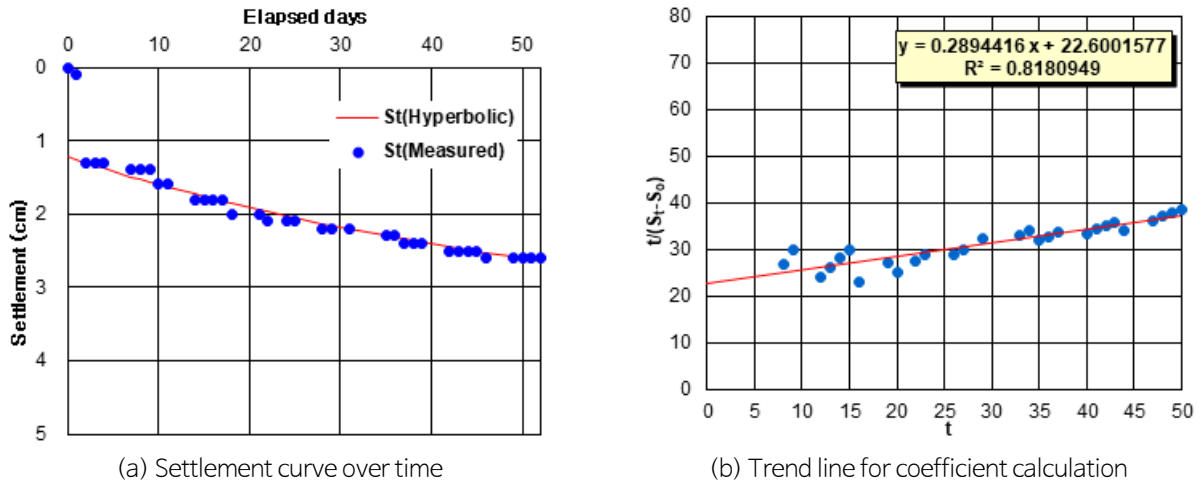


Fig. 7. Settlement prediction result through modified hyperbolic method (1st staged fill).

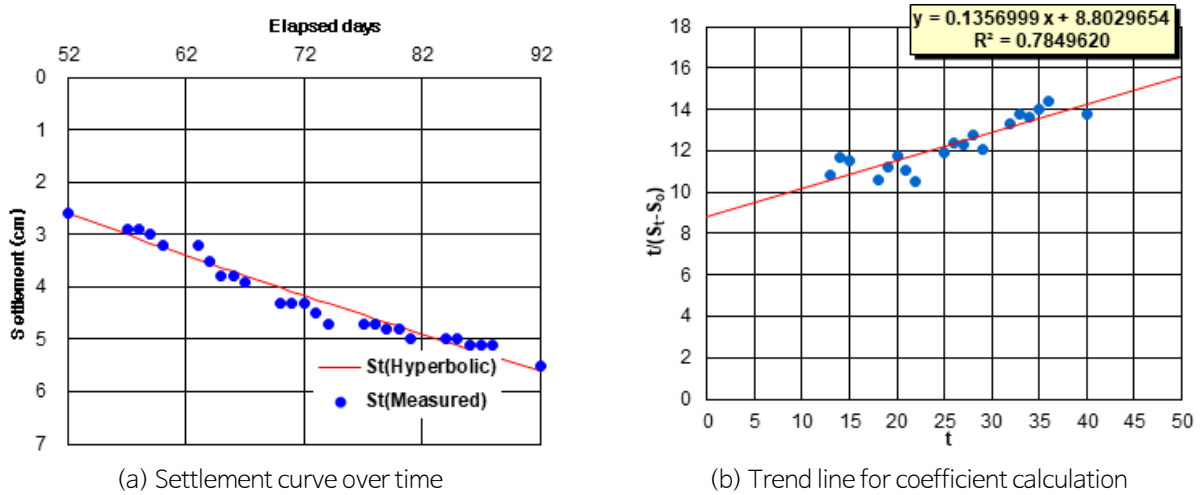


Fig. 8. Settlement prediction result through modified hyperbolic method (2nd staged fill).

3단계성토에서는 2단계 성토가 끝난 지점을 S_{03} 로 설정하고, 최종성토가 끝나는 구간의 침하량을 S_{t3} 로 설정하였다. 이 때 α , β 값을 구하기 위한 $t/(S_t - S_0) - t$ 그래프와 이 때 α , β 값으로 예측한 침하예측곡선은 Fig. 9a and 9b에 나타내었다.

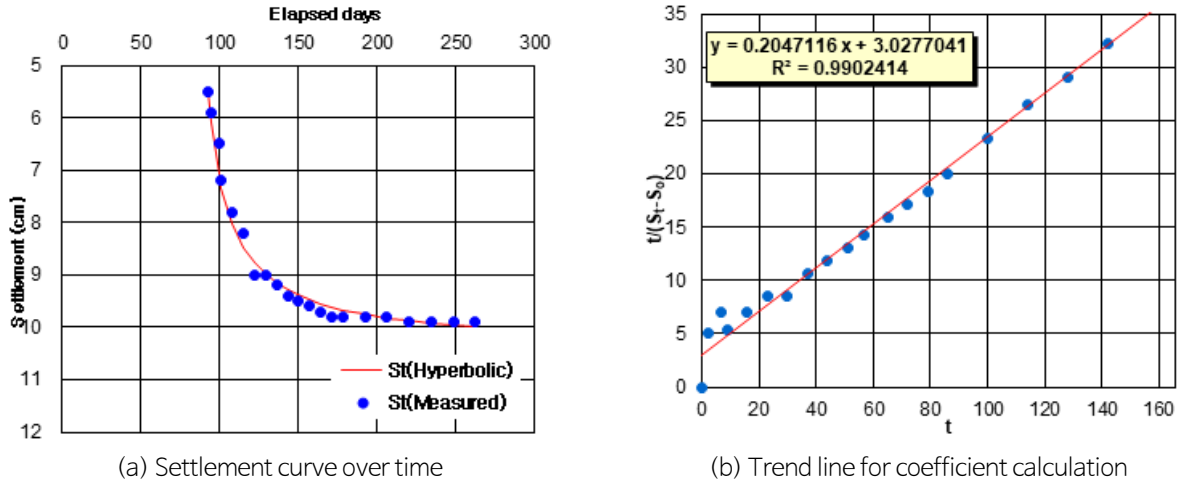


Fig. 9. Settlement prediction result through modified hyperbolic method (3rd staged fill).

단계성토를 고려한 쌍곡선법은 단계성토마다 계측 data의 수렴되는 구간을 이용하여 α , β 값을 구하고 이 값을 통해 침하량을 예측하였다. α , β 값은 쌍곡선법의 기본식의 추세선($\frac{t}{S_t - S_0} = \alpha + \beta t$)의 특성에 따라 값이 결정된다.

α 값은 S_0 의 설정값과 침하거동에 따라 영향을 받는다. 1단계성토는 탄성침하로 인해 S_0 값이 크게 설정되고 탄성침하 거동 이후 소성침하거동을 보이는데 탄성거동에 비해 소성거동은 침하속도와 침하량이 작기 때문에 초기 S_t 는 S_0 에 비해 천천히 증가하여 초기 $t/(S_t - S_0)$ 값이 매우 크게 산정된다. 2,3단계성토는 1단계성토에 비해 탄성침하거동보다 소성침하거동이 더 발생하므로 S_0 를 탄성침하가 아닌 지난 단계성토의 최종침하량으로 설정하였고 이후 과잉간극수압이 소산되며 소성압밀침하가 진행되기 때문에 S_t 가 증가하여 $t/(S_t - S_0)$ 값이 작아져 α 값은 점차 작아지는 양상을 확인할 수 있다(Table 3 참조).

Table 3. Comparison of coefficients of the modified hyperbolic method considering staged fill with those of the existing hyperbolic method

	Existing hyperbolic method		Modified hyperbolic method (considering staged fill)		
	Final settlement section	Entire settlement section	1st stage fill	2nd stage fill	3rd stage fill
α	2.75	29.75	22.6	8.8	3.03
β	0.12	-0.12	0.29	0.14	0.21
k_α	-	-	0.39	0.34	-
k_β	-	-	0.47	1.51	-
R^2	0.99	0.17	0.82	0.78	0.99

β 값은 압밀침하가 큰 증가량을 나타낼수록 높은 값을 가진다. 1단계성토에서는 초기탄성침하로 인해 탄성압밀침하량이 크게 발생하여 가장 큰 β 값이 산정되었다. 2단계성토에는 하중 재하가 이루어지는 구간이므로 상대적으로 소성압밀 침하량이 작아서 β 값이 가장 낮게 산정되었다. 3단계성토는 최종성토고의 유지기간으로 과잉간극수압이 소산되어 2단계성토보다 높은 β 값이 산정됨을 알 수 있다(Table 3 참조).

각 해석방법에 대한 단계성토별 α , β , k 및 결정계수 R^2 값을 Table 3에 나타내었다. 임의로 구분하지 않고 전체 data를 이용한 기존 쌍곡선법 추세선의 R^2 값은 0.17로 매우 낮은 값을 보여 정확한 추세를 보이지 않음을 알 수 있다(Fig. 6 and Table 3 참조). 3단계로 구분된 단계성토의 침하거동을 고려한 쌍곡선법 추세선의 R^2 값은 1단계 0.82, 2단계 0.78, 3단계 0.99로 정확한 추세거동을 예측함을 알 수 있다(Figs. 7~9 and Table 3 참조).

쌍곡선법의 해석에 따른 차이를 비교하기 위해 기존의 쌍곡선법의 일정구간의 data, 전체구간의 data를 이용한 침하예측결과와 단계성토의 거동을 고려한 쌍곡선법의 침하예측결과를 Table 4에 비교하였다. Table 4의 S_t 는 압밀경과일수($t = 262$ 일)에 따른 침하량을 의미하고, S_f 는 예측된 최종압밀침하량($t = \infty$), S_r 은 예측된 최종압밀침하량(S_f)과 압밀경과일수에 따른 실측침하량(S_t)의 차이이다.

Table 4. Comparison of actual and predicted settlement using the existing and modified hyperbolic methods

	Existing hyperbolic method		Modified hyperbolic method considering staged fill			
	Partial section used	Entire section used	1st stage fill	2nd stage fill	3rd stage fill	
S_t (measured settlement)	9.90 cm		2.60 cm	5.50 cm	9.90 cm	
S_t (predicted settlement)	10.13 cm	61.98 cm	2.65 cm	5.41 cm	9.99 cm	
S_f (final settlement)	10.95 cm	-5.50 cm	4.75 cm	9.97 cm	10.4 cm	
S_r (residual settlement)	1.05 cm	-15.40 cm	2.15 cm	4.47 cm	0.50 cm	
Accuracy	S_f	90.4 %	-180.0 %	54.7 %	55.2 %	95.2 %
	S_t	97.7 %	16.0 %	98.1 %	98.4 %	99.1 %

기존의 쌍곡선법의 일정 구간의 data를 이용한 침하예측결과 실측침하량과 예측된 최종압밀침하량의 차이는 1.05 cm (10.95 minus 9.90 cm)를 보였으며 압밀과정에 따른 침하거동을 고려하지 못하는 특징을 보였다(Table 4 and Fig. 5 참조). 기존의 쌍곡선법의 전체구간의 data를 이용한 침하예측결과는 사용할 수 없는 결과(-5.50 cm)를 보였는데 그 이유는 계측 data가 하나의 쌍곡선의 형태가 아닌 단계성토별 3개의 쌍곡선을 형성하는데 이는 비선형성을 띠므로 최적의 α , β 값을 산정하지 못하기 때문으로 해석할 수 있다. 단계성토를 고려한 쌍곡선법의 결과로는 1,2단계성토의 예측된 최종압밀침하량과 실측침하량의 큰 차이(2.15 and 4.47 cm)를 보였다. 그 이유는 예측된 최종압밀침하량은 계측 data가 수렴하였을 때의 침하량, 즉 $t = \infty$ 이며 실측침하량은 $t = 50$ (1단계), $t = 100$ 일(2단계)이 지난 시점의 침하량으로 시점이 달라 생기는 차이로 해석된다. 1,2단계성토의 압밀경과일수($t = 50, 100$ 일)에 따른 침하량의 차이는 각각 0.05 cm (2.65 minus 2.60 cm), 0.09 cm (5.50 minus 5.41 cm)로 매우 정확한 예측(98.1%, 98.4%)임을 확인할 수 있다. 3단계성토는 예측된 최종압밀침하량($t = \infty$ 일)과 실측침하량($t = 262$ 일)의 차이가 0.5 cm (10.4 minus 9.90 cm)로 정확한 예측을 확인할 수 있다 (Table 4 참조). 3단계성토의 압밀경과일수($t = 262$ 일)에 따른 예측침하량과 실측침하량의 차이는 0.09 cm (9.99 minus 9.90 cm)로 매우 정확한 예측(99.1%)임을 확인할 수 있다. 이는 예측된 최종압밀침하량과 실측침하량($t = 262$ 일)의 시점이 모두 수렴되는 구간으로 큰 차이가 나지 않기 때문으로 사료된다. 예측정확도는 식 (2)를 통하여 산정하며 경과시간에 따른 예측침하량과 예측된 최종침하량을 구분하여 제시하였다. 이 결과를 종합하여 각 해석방법에 대한 침하예측결과를 Table 4에 나타내었다.

결론

본 논문에서는 Preloading을 단계성토로 연약지반처리 시 침하관리를 creep 거동을 고려한 쌍곡선법을 이용하여 예측하고 압밀거동변화계수 k 를 제안하였다. 해석결과는 다음과 같다.

- (1) 기존의 쌍곡선법은 실측data의 압밀이 상당히 진행된 구간의 data만을 이용하여 α , β 값을 산정하여 최종침하량을 예측하였다. 또한, α , β 값을 구하기 위한 추세식의 결정계수를 높이기 위해 curve fitting을 하여 수렴구간의 data만 사용하는 것은 초기탄성침하 및 creep을 고려하지 않음을 의미한다.
- (2) 단계성토의 경우 계측 data는 단계별 쌍곡선 형태의 data를 획득하기 때문에 기존의 쌍곡선법으로는 침하량을 예측하기 위한 α , β 값을 구하기 위해서는 일정 수렴하는 구간의 계측 data만을 사용해야 한다. 그러나 단계성토 시 creep 거동이 발생하기 때문에 보다 정확한 예측을 위해서는 전체 data를 기반으로 α , β 값을 산정하여 예측침하량을 구해야 한다.
- (3) 단계성토를 고려한 쌍곡선법 해석결과, 이후 소성압밀침하량이 발생하는데 탄성압밀침하량에 비해 소성압밀침하량의 증가폭이 작기 때문에 α 값이 점차 줄어드는 양상을 확인할 수 있었다. β 값은 침하량 증가폭에 따라 크게 산정되며 1단계성토에서는 초기탄성침하로 인해 탄성압밀침하량이 발생하게 되어 침하량 증가폭이 커서 α 값이 가장 크게 산정되고 2단계성토에는 하중재하시점으로 과잉간극수압이 소산되는 과정으로 가장 낮게 산정되었으며, 3단계성토에는 최종성토하중 유지시점으로 과잉간극수압이 소산되어 소성압밀침하량이 크게 발생하였으나 탄성압밀침하량에 비해서는 작기 때문에 1단계성토보다는 작은 값을 보였다.
- (4) 단계성토를 고려한 쌍곡선법 예측결과, 실제침하량과 압밀경과일수($t = 262$ 일)에 따른 예측침하량을 비교하였을 때 1단계성토(+0.05 cm), 2단계성토(-0.09 cm 차이), 3단계성토(+0.09 cm) 모두 매우 높은 정확도를 나타냈으며, 최종예측압밀침하량($t = \infty$) 또한 기존의 쌍곡선법(90.4%)보다 높은 정확도(95.2%)를 나타내었다.
- (5) 단계성토를 고려한 쌍곡선법은 초기탄성침하 및 creep 거동을 고려할 수 있는 해석방법으로 기존의 쌍곡선법보다 높은 정확도를 가진다. 나아가, 여러 지반을 표본으로 본 논문에서 제안한 해석방법을 적용하여 각 지반에 따른 압밀거동변화계수 k 를 제시하여 짧은 계측data으로도 침하거동의 예측이 가능할 것으로 기대된다.

References

- Asaoka, A., 1978, Observational procedure of settlement prediction, *Soils and Foundations*, 18(4), 87-101.
- Baek, W.J., Matsuda, H., Choi, W.J., Kim, C.K., Song, B.G., 2008, An analysis of the settlement behavior of soft clayey ground considering the effect of creep during the primary consolidation, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 24(5), 107-115 (in Korean with English abstract).
- Choo, Y.S., Kim, J.H., Hwang, S.H., Chung, C.K., 2010, The optimization of hyperbolic settlement prediction method with the field data for preloading on the soft ground, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 26(7), 147-159 (in Korean with English abstract).
- Chun, S.H., Kim, H.S., Yune, C.Y., Chung, C.K., 2011, Newly developed settlement prediction method on soft soils with subsequent surcharge change, *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, 31(5), 155-162 (in Korean with English abstract).
- Hoshno, S., 1962, Problems of foundations in recent years, *Society of Civil Engineering*, 47(7), 63-67.
- Jeon, S.C., Han, H.S., 2021, Behavior analysis of ground anchor using creep, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 22(12), 56-67 (in Korean with English abstract).

- Ladd, C.C., Foott, R., Ishihara, K., Schosser, F., Poulos, H.J., 1977, Stress-deformation and strength characteristics, Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, 421-494.
- Park, E.S., 2018, The experimental study on the long-term creep settlements of Nam-Hae sands, Journal of the Korea Geotechnical Society, 19(9), 21-28 (in Korean with English abstract).
- Tan, T.S., Inoue, T., Lee, S.L., 1991, Hyperbolic method for consolidation analysis, Journal of Geotechnical Engineering, 117(11), 1723-1737.
- Yin, J.H., Graham, J., 1996, Elastic visco-plastic modeling of one-dimensional consolidation, Geotechnique, 46(3), 515-527.
- Yoo, H.K., Kim, J.H., 2000, A study on the prediction of long-term settlement by the modified hyperbolic method, Journal of the Korean Geotechnical Society, 16(3), 163-172 (in Korean with English abstract).