Journal of the Korean Geo-Environmental Society
15(12): 97～107. (December, 2014) http://www.kges.or.kr
ISSN 1598-0820
DOI http://dx.doi.org/10.14481/jkges.2014.15.12.97

# SPSFC법을 이용한 단계성토 시 침하량 예측

# Settlement Prediction for Staged Filling Construction Using SPSFC Method

강 성 현[1] · 김 태 형†
Seonghyeon Kang · Taehyung Kim

Received: September 12th, 2014; Revised: October 10th, 2014; Accepted: November 2nd, 2014

**ABSTRACT :** Settlement prediction has been conducted using Hyperbolic, Hoshino, and Monden methods, etc in the fields. These methods are only able to predict settlement after finishing the final filling stage. A new method is proposed to make up for such a weak point. This method was named as SPSFC (Settlement Prediction for Staged Filling Construction) method, which can be able to predict the settlement both the final filling stage and the staged filling from the initial filling stage in soft ground. To verify the applicability of the SPSFC method, firstly. The settlement predicted by the existed methods are compared with that obtained by the SPSFC method. The comparison results indicate the SPSFC has enough reliability to use for prediction of settlement. Secondly. by analyzing the settlement data measured during the initial filling stage, the soil parameters which need to predict the settlement are obtained by the SPSFC method. Then using the obtained soil parameters the time-settlement curve is predicted and compared. The predicted settlement is well matched with the measured one. From the study, the SPSFC method can be possible to predict settlement during the staged filling with only the initial settlement data.

**Keywords :** SPSFC, Settlement prediction, Staged filling, Initial filling stage, Soft ground

**요 지 :** 현장에서 널리 활용하고 있는 침하예측기법으로는 Hyperbolic법, Hoshino법, Monden법 등이 있다. 이들 기존 침하예측법은 최종침하량 예측이 최종 성토단계가 완료된 이후 가능하다는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 기존 예측법의 단점을 보완할 수 있는 새로운 침하량 예측법(SPSFC: Settlement Prediction for Staged Filling Construction)을 제안하였다. 이 방법은 연약지반에서 성토 완료 후뿐만 아니라, 초기 성토단계에서 단계성토별 시간-침하곡선을 예측할 수 있다. SPSFC법을 검증하기 위해 연약지반 개량을 위한 배수공법이 적용된 낙동강 하구 지역 두 개 현장에서 계측된 자료를 이용하여 기존 예측기법과 함께 SPSFC법으로 장래침하량을 예측하였다. 비교 결과, SPSFC법으로 예측된 침하량이 기존 예측법과 비교해서 신뢰성이 있음을 확인하였다. 또한 SPSFC법으로 초기 성토 단계에서 침하계측자료를 분석하여 예측에 필요한 지반상수를 구하고 이것을 이용하여 나머지 단계 성토 시 발생할 시간-침하량 곡선을 도시하였다. SPSFC법으로 예측된 침하량이 계측치와 잘 일치하는 것으로 나타나 SPSFC법으로 초기 성토단계의 침하계측 값만을 가지고 장래 침하량 예측이 가능함을 확인하였다.

**주요어 :** SPSFC, 침하량 예측, 단계성토, 초기 성토단계, 연약지반

## 1. 서 론

일반적으로 연직배수재가 적용된 연약지반 개량 현장에서는 침하계측 자료를 토대로 침하거동을 예측, 평가하는 일련의 시공관리가 수행된다. 이것은 연약지반에서 설계 시 예측된 침하량과 실제 침하거동 사이에 차이가 발생하기 때문이다. 예측값과 실측값에 차이가 발생하는 원인으로는 실제 흙의 불균질성, 해석 입력 지반정수의 결정 문제점, 이론해의 한계성 및 시공 조건 가변성 등을 들 수 있다. 예를 들어 싱가폴 준설매립 지반개량 공사에서 실내 또는 현장 시험결과로 예측된 최종 압밀침하량은 실제침하량과 약 ± 20 %의 차이를 보였다(Bo et al., 2003). 이 경우는 침하량이 매우 우수하게 예측된 예이다. 우리나라의 경우 예측 정확도가 매우 떨어지는 사례를 가지고 있다. Chung(1999)은 낙동강 삼각주 지역의 연약지반 개량공사에서 설계된 최종침하량은 실제보다 120～200 % 과소평가된다고 하였다. 위 사례는 연약지반 개량에서 가장 어려운 점이 신뢰할 수 있는 침하거동의 예측이라는 것을 보여준다(Arulrajah et al., 2004).

실제침하량과 예측침하량의 불일치 문제점을 보완하기 위

1) Korea Maritime and Ocean University
† Korea Maritime and Ocean University (Corresponding Author : kth67399@kmou.ac.kr)

해 시공 중 현장 계측자료를 이용한 예측법을 실무에서 많이 활용하고 있다. 현재 현장에서 많이 사용되고 있는 침하 예측기법으로는 Hyperbolic법, Hoshino법, Monden법, Asaoka법 등이 있고 이들 방법에 대한 많은 연구들이 진행되었다(Hoshino, 1962; Monden, 1963; Asaoka, 1978; Tan et al., 1991; Chung et al., 2014; Sridharan et al., 1987; Edil et al., 1991).

현재 사용되고 있는 침하량 예측법들이 가진 하나의 단점은 모든 방법이 연약지반에 최종 성토 재하가 완료된 이후의 침하 계측 자료만을 이용하여 침하량을 예측하고 있다. 그러나 연약지반 상에 성토를 할 경우에는 지반의 낮은 강도 때문에 성토 사면의 안정성 확보를 위하여 대부분은 단계성토를 계획하여 점진적으로 재하가 이루어지게 된다. 따라서 연약지반 개량 현장의 효율적 시공 관리를 위해서는 최종 성토고 조건이 아닌 초기 성토단계에서 계측된 자료를 이용하여 다음 단계성토에 따른 침하량을 예측할 수 있는 방법이 필요하다. 만약 단계성토에 따른 정확한 침하량 예측이 가능하면 성토기간, 성토고 등을 효과적으로 조정하여 합리적인 시공관리가 가능할 것이다.

본 연구에서는 기존 침하예측법의 단점을 보완하여 최종 성토 완료 후뿐만 아니라 초기 성토단계에서도 침하량을 예측할 수 있는 SPSFC(Settlement Prediction for Staged Fill Construction)법을 제시하였다. 제안된 SPSFC법의 검증을 위해 연약지반 처리를 위해 연직배수공법이 적용된 낙동강 하구 지역 2개 현장의 계측된 결과를 이용하였다. 검증은 먼저 기존 침하 예측기법 및 SPSFC법으로 산정된 최종침하량의 상호 비교·분석을 통해 SPSFC법의 침하량 예측 적용 가능성을 알아보았다. 이후 초기 성토단계에서 계측된 침하량 자료를 이용하여 SPSFC법으로 역해석 지반정수를 재산정하여 단계성토에 따른 시간-침하량 곡선을 예측하고, 최종 단계의 침하량을 예측하였다. 즉 제안된 SPSFC법이 초기 성토단계에서도 장래 침하량 예측이 가능함을 확인하는 것이다.

## 2. SPSFC법

### 2.1 기본방정식

일반적으로 연약지반 깊이가 깊고 배수재가 적용된 경우 연직방향 보다는 수평방향의 배수가 지배적으로 작용하여 압밀이 진행된다(Lee & Chung, 2010). 그래서 본 연구에서 제안된 SPSFC법은 Barron(1948)의 수평방향압밀해(Eq. (1))를 기본으로 하였다.

$$U = 1 - \exp(-\frac{8T_h}{F}) \tag{1}$$

여기서 $T_h$는 수평방향압밀시간계수이고 F는 저항계수로 배수간격항($F_n$), 스미어항($F_s$), 웰레지스턴스항($F_r$)의 합이다($F = F_n + F_s + F_r$). Lee & Chung(2010)은 배수간격항($F_n$)과 스미어항($F_s$) 저항은 몇 개의 개략적인 해들이 존재하는데 이들 사이의 차이(에러)는 무시할 수 있을 정도로 작다고 하였다. 하지만 웰레지스턴스항($F_r$)은 서로 다른 몇 개의 해가 존재하는 것으로 알려져 있다(Hansbo, 1979; Hansbo et al., 1981; Onoue, 1988; Yoshikuni & Nakanodo, 1974).

압밀도와 침하량의 관계는 Eq. (2)와 같다.

$$U = \frac{S}{S_f} \tag{2}$$

여기서 $S_f$는 최종침하량이고 S는 임의 시간에서의 침하량이다. Eq. (2)를 이용하여 Eq. (1)을 다시 표현하면 Eq. (3)과 같다.

$$S = S_f(1 - \exp(-\frac{8T_h}{F})) \tag{3}$$

수평방향압밀시간계수($T_h$)와 최종침하량($S_f$)은 Eq. (4)와 같다.

$$T_h = \frac{C_h\, t}{H_d^2} \tag{4}$$

$$S_f = \frac{C_c}{1+e} \cdot H \cdot \log\frac{P_o + \Delta P}{P_o} \tag{5}$$

여기서 $C_h$는 수평방향압밀계수, t는 시간, $H_d$는 배수거리, $C_c$는 압축지수, e 간극비, H는 연약층두께, $P_0$은 초기유효응력, ΔP는 증가응력(성토)이다.

Eq. (4)와 Eq. (5)를 Eq. (3)에 대입하여 다시 표현하면 다음과 같다.

$$S = C_c(\frac{1}{1+e} \cdot H \cdot \log\frac{P_o + \Delta P}{P_o})(1 - \exp(-\frac{8}{H_d^2} \cdot \frac{C_h t}{F})) \tag{6}$$

Eq. (6)을 상수 $C_1$과 $C_2$를 사용하여 다시 정리하면 지수함수로 표현된 임의 시간에서 침하량 산정식을 Eq. (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$S = C_1 \cdot C_c(1-\exp(-C_2 \cdot \frac{C_h \cdot t}{F})) \quad (7)$$

여기서 $C_1 = \frac{1}{1+e} \cdot H \cdot \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o}$

$$C_2 = -\frac{8}{H_d^2}$$

## 2.2 특징

SPSFC법은 기존 예측기법들의 침하량 분석에서 전혀 고려하지 않았던 실내·현장 시험 자료 및 배수재 타설 현황 등을 해석에 이용하여 각 현장별 지역적 특성을 반영할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

Eq. (7)에서 $C_1$ 및 $C_2$는 현장의 실험데이타를 이용하여 산정하는 상수이다. $C_1$은 대상 현장의 간극비(e), 연약층 두께(H), 성토 하중(ΔP) 등을 고려하여 산정되며, 상수 $C_2$는 배수재 타설 간격, 배수재 타설 장비 재원, 배수재 타설 길이 및 지반의 압밀계수 등을 고려하여 산정된다. $C_c$, $C_h$ 및 F는 예측기법 수행을 통해 얻어지는 계수 값이다. 해석의 신뢰성을 확보하기 위하여 $C_c$, $C_h$ 및 F의 초기값은 각 현장에서 얻어진 지반정수를 이용한다. SPSFC법을 통해 최종침하량 예측뿐만 아니라 현장의 $C_c$ 및 $C_h$ 지반계수를 직접적으로 산정하여 역해석도 가능하다.

SPSFC법은 또한 얻어진 지반 계수를 이용하여 단계성토에 따른 시간-침하량 곡선 재현도 가능하다. 다른 기존 예측기법들도 최종침하량 예측뿐만 아니라 $C_c$ 및 $C_h$ 지반계수를 간접적으로 얻을 수 있으나, 단계성토에 따른 시간-침하량 곡선을 재현하기에는 많은 어려움이 있다. 왜냐하면 현장에서 널리 활용하고 있는 기존 침하예측법은 최종 성토단계가 이루어진 이후에서만 적용하기 때문이다.

# 3. 대상 현장

## 3.1 화전지구

화전지구는 해안선에 인접한 매립지와 서낙동강 하구에 위치하고 있으며, 낙동강을 경계로 북서쪽은 비교적 높은 산세의 급경사를 보이고, 오른쪽은 낙동강 하구로 삼각주상의 충적지가 발달되어있다.

지층은 크게 상부 사질토층, 점성토층, 하부 사질토층으로 구분 된다. Fig. 1은 이 지역의 대표토질주상도를 나타낸다. 상부 사질토층은 실트질 모래와 점토질 모래로 구성되어 5.2 ~11.9 m의 층후를 가진다. N치는 0~24로 매우 느슨~중

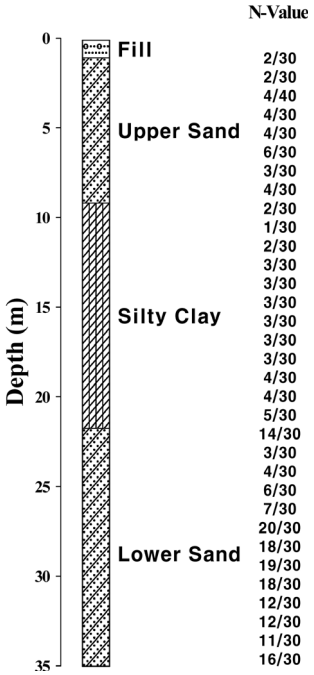


Fig. 1. Representative soil profile (Hwajeon site)

Table 1. Soil parameters (Hwajeon site)

| Items | Symbol | Unit | Upper sand layer | Clay layer | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Upper | Middle | Bottom |
| | | | | GL.(-) > 20 m | GL.(-) 20~25 m | GL.(-) < 25 m |
| Saturation unit weight | $\gamma_{sat}$ | kN/m$^3$ | 16.8 | 16.6 | 16.1 | 18.0 |
| Specific gravity | Gs | - | | 2.70 | 2.70 | 2.69 |
| Soil classification | USCS | - | SM | CH, ML, CL | | |
| OCR | - | - | - | 1.02 | 0.99 | 0.95 |
| Compression index | $C_c$ | - | - | 0.74 | 1.11 | 0.58 |
| Initial void ratio | $e_o$ | - | - | 1.59 | 1.80 | 1.08 |
| Vertical consolidation coefficient | $C_v$ | cm$^2$/sec | - | $1.5\times10^{-3}$ | $1.5\times10^{-3}$ | $3.0\times10^{-3}$ |
| Horizontal hydraulic conductivity | $k_h$ | cm/sec | $6.75\times10^{-4}$ | $2.0\times10^{-7}$ | $2.0\times10^{-7}$ | $4.0\times10^{-7}$ |
| Undrained shear strength | $S_u$ | kPa | - | $S_u$=14.95×Z+138.27 | | |
| Strength increment ratio | m | - | - | 0.28 | | |

간조밀 상태로 나타나며, 전 지역에 걸쳐 전반적으로 분포한다. 점성토층은 실트질 점토로 구성되어 3.9~44.5 m의 층후를 가지고, 남동 측 방향으로 갈수록 두껍게 분포하며, 평균 N치는 0~5로 매우 연약~연약한 연경도를 보인다. 하부 사질토층은 자갈질 모래, 실트질 모래, 점토질 모래로 구성되어 1.0~22.0 m로 나타나며, N치는 0~44로 매우 느슨~조밀한 상태를 나타낸다. Table 1은 이 지역 토질의 물성값이다.

### 3.2 미음지구

미음지구는 옥녀봉, 금병산 등을 정점으로 동서, 북서-남동 및 북동-남서방향의 산계들이 에워싸며, 부지 내부는 매봉산의 야산 및 충적평야로 형성되어 있다. 인근의 낙동강 하류 및 서낙동강으로 유입되는 지류들이 발달하였다.

지층은 매립층, 퇴적층(점토, 모래, 점토질 모래, 자갈질 모래, 모래질 자갈 등), 풍화대층(풍화토, 풍화암), 기반암(연암)층의 순으로 분포한다. Fig. 2는 이 지역의 대표 토질 주상도를 나타낸다. 최상부 매립층은 N치가 0~2를 가지고 일부 구간에 모래, 자갈, 호박돌을 함유하고 있다. 점토층은 상부에서 대략 25 m 심도까지 분포하고 있으며, N치는 0~5로 분포하며 일부구간에 점토, 세립질모래, 잔자갈, 유기물을 함유하는 통리분류법상 CL~CH로 분류된다. Table 2는 이 지역 토질의 물성값이다.

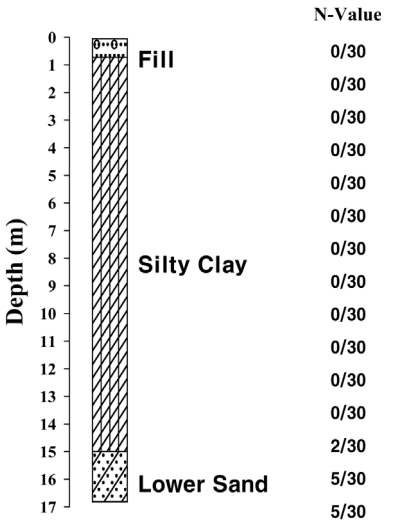


Fig. 2. Representative soil profile (Miyeom site)

## 4. SPSFC법 검증

본 연구에서 제안된 SPSFC법의 검증은 다음과 같이 두 단계 걸쳐 이루어졌다. 첫 단계는 SPSFC법이 다른 기존 침하량 예측법처럼 사용이 가능한지 검증하는 단계이다. 검증을 위해 현재 많이 사용되고 있는 Hyperbolic법, Hoshino법, Monden법으로 최종침하량을 예측하고 그 결과를 SPSFC법으로 산정된 결과와 서로 비교하였다. 기존 침하량 예측법을 적용하는데 있어 본 연구에서는 계측 데이터인 시간-침하량 곡선을 반복적인 비선형회귀를 통하여 계수 $\alpha$, $\beta$를 결정하여 사용하였다. 기존에는 시간-침하량 곡선을 축 변환을 통하여 선형 회귀 분석을 통해 계수 $\alpha$, $\beta$를 결정하고 최종침하량을 산정하는 방법을 사용하였으나 최근에는 최종침하량 산정에서 $\alpha$, $\beta$를 비선형회귀로 분석된 값을 사용하고 있는 실정이다.

두 번째 검증단계에서는 초기 성토단계에서 계측된 시간-침하량 데이터를 SPSFC법으로 분석하여 지반정수를 산정하여 다음 단계성토 시 발생할 시간-침하량 곡선을 도시하여 최종침하량을 예측하였다. 즉 제안된 SPSFC법이 초기 성토단계에서도 장래 침하량 예측이 가능함을 확인하는 것이다.

본 연구에서 이용된 기존 예측법들의 회귀식은 다음과 같다.

Table 2. Soil parameters (Miyeom site)

| Items | Symbol | Unit | Clay layer | |
|---|---|---|---|---|
| | | | G.L(±)0.0~G.L(-)10 m | G.L(-)10 m below |
| Water content | $\omega_n$ | % | 92 | 60 |
| Unit weight | $\gamma_t$ | kN/m$^3$ | 15.0 | 16.0 |
| Soil classification | USCS | - | CH, CL, ML | |
| Initial void ratio | $e_o$ | - | 2.45 | 2.00 |
| Compression index | $C_c$ | - | 1.11 | 0.90 |
| Vertical consolidation coefficient | $C_v$ | cm$^2$/sec | Zone 1 : $1.18\times10^{-3}$<br>Zone 2 : $3.20\times10^{-4}$<br>Zone 3 : $3.00\times10^{-4}$<br>Zone 4 : $1.04\times10^{-3}$ | |
| Undrained shear strength | $S_u$ | kN/m$^2$ | 14.0 | 26.8 |
| Strength increment ratio | m | - | 0.28 | 0.30 |

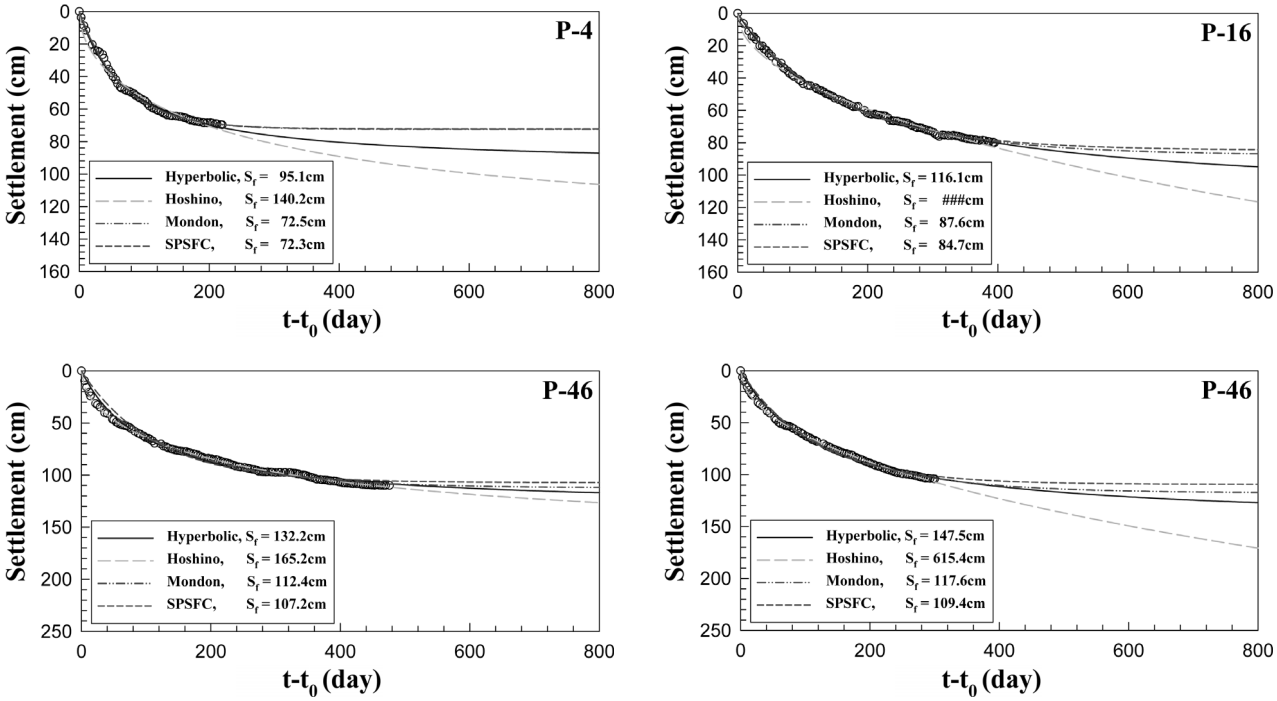


Fig. 3. Results of the settlements predicted by Hyperbolic, Hoshino, Monden, and SPSFC methods (Hwajeon site)

- Hyperbolic법

$$S-S_i=\frac{t-t_i}{\alpha+\beta(t-t_i)} \tag{8}$$

- Hoshino법

$$S-S_i=\left(\frac{t-t_i}{\alpha+\beta(t-t_i)}\right)^{0.5} \tag{9}$$

- Monden 법

$$S=S_f(1-10^{\alpha+\beta t}) \tag{10}$$

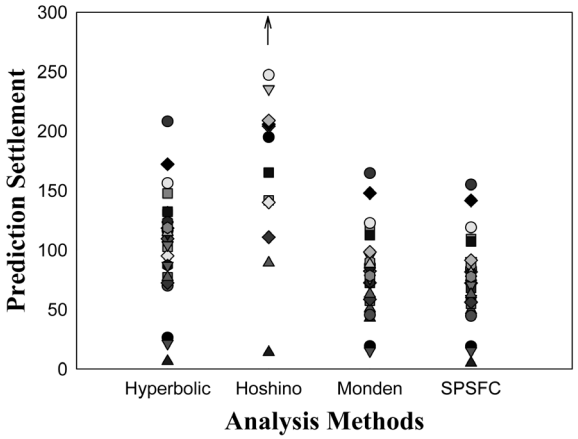


Fig. 4. Predicted final settlements (Hwajeon site)

## 4.1 화전지구

### 4.1.1 최종침하량 예측

화전지구에서 계측된 시간-침하량 곡선에 대하여 각종 침하량 예측기법을 통해 침하량을 총 30구역에 대해 산정하였다. Fig. 3은 대표적으로 선정된 4개 구역(P-4, P-16, P-46, P-64)의 침하량 산정 결과이다. Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이 Hyperbolic법은 전체적으로 Monden법, SPSFC법보다는 침하량을 다소 크게 예측하고, Hoshino법보다는 침하량이 상대적으로 작게 예측되는 것을 알 수 있다. Hoshino법은 다른 예측법들에 비해 매우 큰 침하량 예측하고 있다. P-16 및 P-46 구역의 경우가 대표적인 예로 Hoshino법으로 예측된 최종 침하량은 다른 예측법으로 산정된 결과에 비해 비논리적으로 큰 것을 알 수 있다. Hoshino법으로 예측된 값이 비현실적으로 너무 크게 산정된 값에 대해서는 Fig. 3 (P-16)에 "###"와 같이 표기하였다. SPSFC법에 의해 예측된 최종침하량은 Monden법에 의한 결과와 유사한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 4는 전체 구역에 대한 각종 예측기법을 통해 얻어진 최종침하량들을 도시한 결과이다. 여기서 Hoshino법으로 예측된 최종침하량은 다른 예측기법에 의해 산정된 결과들에 비해 분포는 매우 산만하며, 값들이 매우 크게 예측되어 일반적인 해로 보기에는 힘든 경우가 빈번히 발생하였다. Hoshino법에 의한 예측 값 중 비교가 어려울 정도로 큰 값들에 대해서는 Fig. 4에서 "↑"와 같이 표기하였다. SPSFC법으로 예측된 최종침하량의 분포는 Hyperbolic법과 Monden법

에 의해 얻어진 범위 안에 있음을 알 수 있다. 이는 SPSFC법에 의한 예측값들이 기존 예측 기법들에 의해 얻어진 값들의 범위 안에 있으며 유사한 경향성을 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 5는 현재 침하량 예측에 많이 사용되고 있는 Hyperbolic법을 기준으로 상대적인 침하량 분산도를 알아보기 위해 도시한 그림이다. Monden법과 SPSFC법은 Hyperbolic법에 비해 평균적으로 각각 0.74, 0.72배 작게 침하량을 예측하였다. 일관성 측면에서 보면 Monden법과 SPSFC법이 Hoshino법에 비해 매우 우수함을 알 수 있다.

Fig. 6~Fig. 8은 Hoshino법을 제외한 나머지 예측법과의 상관관계를 알아보기 위해 도시한 결과이다. Fig. 6은 기존에 많이 사용되고 있는 Hyperbolic법과 SPSFC법과의 상관관계를 나타낸 것으로 결정계수 $R^2$가 0.958로 높은 상관관계를 보이고 있어 SPSFC법의 신뢰성이 높음을 간접적으로 알 수 있다. Fig. 7은 Hyperbolic법과 Monden법의 상관관계를 나타낸 것으로 두 결과사이의 상관관계 결정계수 $R^2$가 0.945로 SPSFC법보다는 조금 낮은 수치를 보였다. Fig. 8은 Monden법과 SPSFC법의 상관관계를 나타낸 것으로 결정계수 $R^2$가 0.996 값을 보이고 있어, 두 방법이 매우 비슷한 값을 예측할 뿐만 아니라 상관성도 매우 높음을 알 수 있다. 두 방법의 상관도가 높은 이유는 Monden법에 사용되는 기본이 식이 SPSFC법의 기분식인 Eq. (1)과 같기 때문이다.

Fig. 9는 예측된 침하량과 계측된 침하계측자료의 편차를 정의하는 Root Mean Square Error를 이용하여 신뢰도를 평가한 결과이다. RMSE는 Eq. (11)로 정의된다.

$$\text{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum(S_{pred}-S_{meas})^2}{N}} \tag{11}$$

RMSE 값은 Monden법, Hyperbolic법, SPSFC법, Hoshino법 순으로 각각 0.25, 0.48, 0.78, 3.81로 산정되어, RMSE 값이 작을수록 신뢰도가 높다는 것을 의미한다. 화전지구의 경우 Monden법이 가장 신뢰도가 높은 것으로 평가되었다. SPSFC법은 RMSE 값이 Moden법과 Hyperbolic법 보다 다

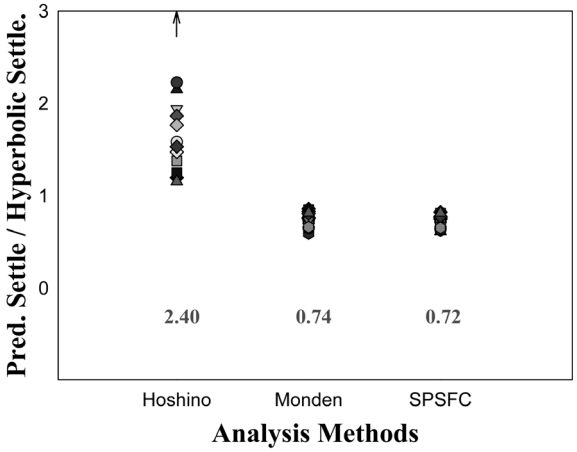


Fig. 5. Comparison of the final settlements based on the Hyperbolic method (Hwajeon site)

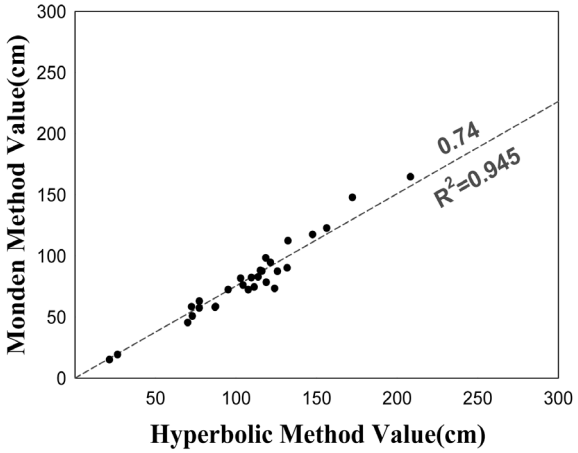


Fig. 7. Settlement correlation between Hyperbolic and Monden methods (Hwajeon site)

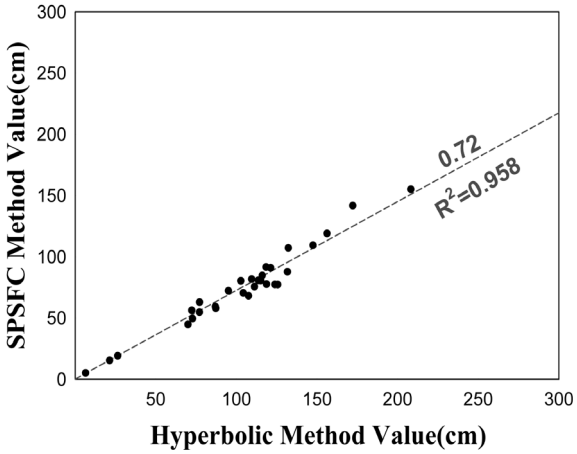


Fig. 6. Settlement correlation between Hyperbolic and SPSFC methods (Hwajeon site)

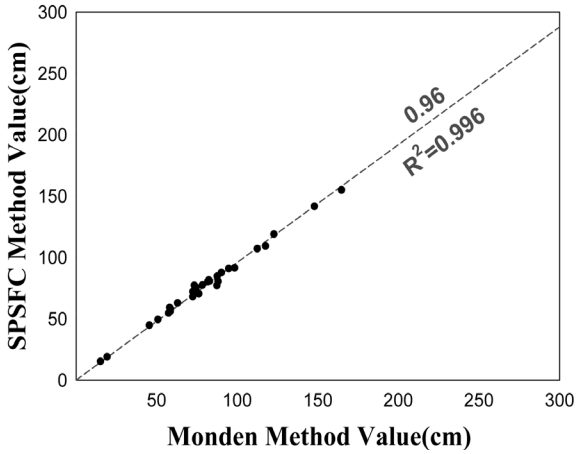


Fig. 8. Settlement correlation between Monden and SPSFC methods (Hwajeon site)

소 크게 나타났다. SPSFC법의 RMSE 값을 실제 침하량으로 환산하면 매우 작은 값으로 최종침하량 예측에는 미비한 영향을 줄 것으로 판단된다. Hoshino법에 의한 값은 비교가 어려울 정도로 커 그림에서 "↑"와 같이 표기하였다.

Fig. 3~Fig. 9의 결과를 종합해 보면 제안된 SPSFC법이 다른 기존의 침하예측법과 비교 시 충분한 신뢰성을 가지고 있음을 알 수 있다. 즉 이것은 SPSFC법으로 최종침하량을 예측하는데 큰 문제가 없음을 의미하는 것이다.

#### 4.1.2 초기 단계성토에서 최종침하량 예측

제안된 SPSFC법의 적용성은 4.1.1에서 충분히 확인하였다. 본 장에서는 SPSFC법의 가장 큰 장점인 기존 예측법들로는 재현하기 어려운 초기 단계성토 시 발생된 시간-침하량 곡선을 이용한 다음 단계성토 시 발생할 시간-침하량 곡선의 예측이다. 초기 단계성토에서의 시간-침하량 자료를 SPSFC법으로 분석하여 지반정수를 산정하여 침하량을 예측하는 것이다.

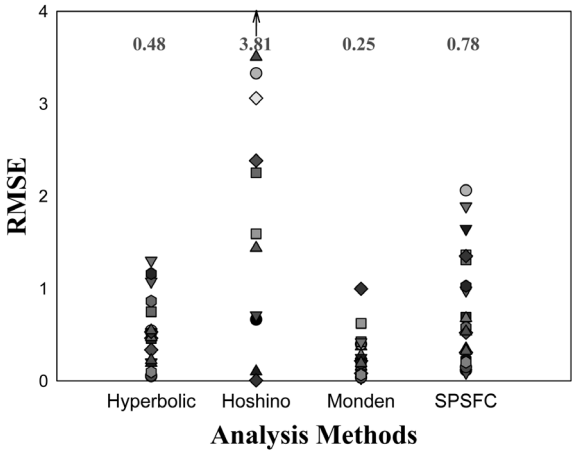


Fig. 9. Results of RMSE (Hwajeon site)

Fig. 10은 선택된 4개 구역의 결과로 단계성토별 시간-침하량 곡선이 현장 계측값과 잘 일치함을 볼 수 있다. 이는 SPSFC법으로 단계성토별 시간-침하량 곡선 예측이 매우 유용하게 사용할 수 있음을 보여주는 자료이다. 대부분이 구역에서 SPSFC법으로 예측된 값이 현장 계측값과 잘 일치하나 일부 구역에서는 SPSFC법을 이용한 예측침하량이 계측값과 잘 맞지는 않는 경우도 발생하였다.

Fig. 11은 예측된 시간-침하량 곡선이 현장 계측치와 매우 상이함을 보여 주는 예이다. 예측값과 계측값의 차이는 여러 원인이 있을 수 있는데 대표적으로 다음 두 가지를 들 수 있다. 첫 번째는 현장 침하량 계측 자료가 성토하중에 따라 불규칙한 침하 경향을 보이는 경우이다. 예를 들어 단계성토하중의 변화가 크지 않지만 침하량은 매우 크게 발생하는 경우에 해당된다. 두 번째는 성토 초기 침하량 계측의 누락이다. 이 경우는 초기 성토하중에 의해 침하가 일어나지 않다가 갑작스러운 침하가 발생하는 침하 패턴을 보인다.

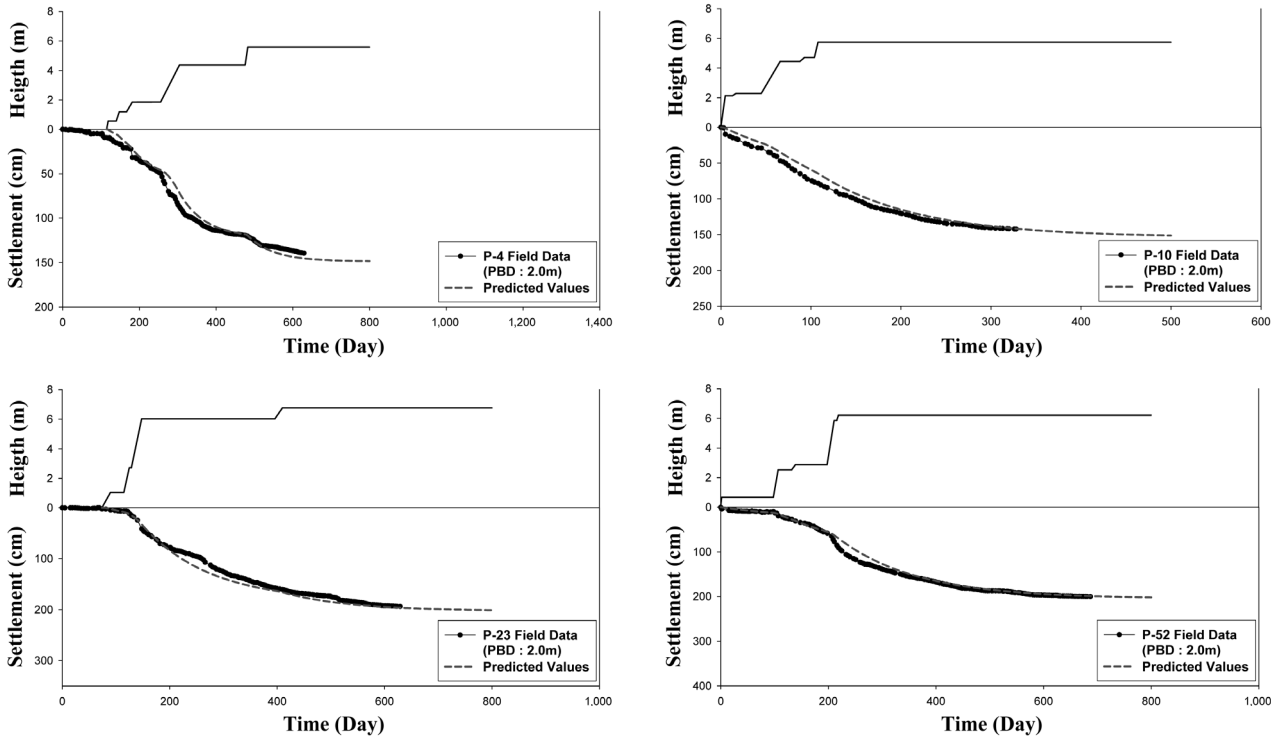


Fig. 10. Comparison the time-settlement curve predicted by the SPSFC method with the measured data (Hwajeon site): Well matched cases

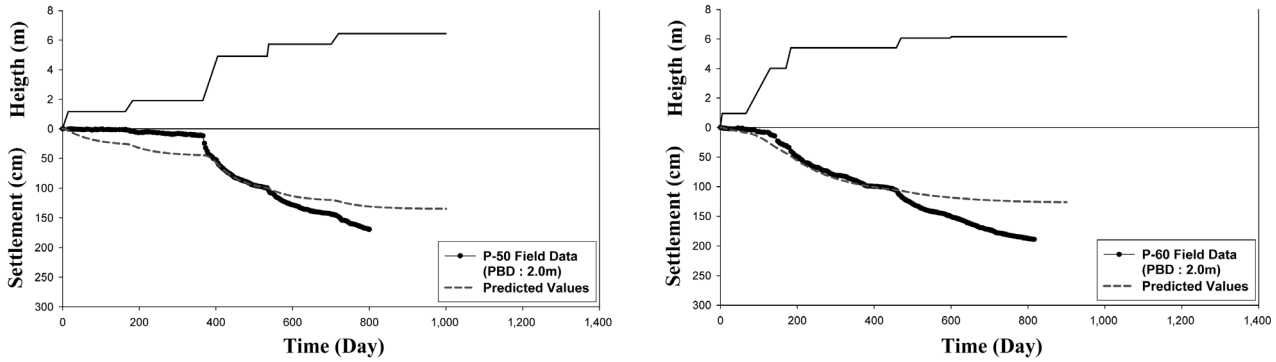


Fig. 11. Comparison the time-settlement curve predicted by the SPSFC method with the measured data (Hwajeon site): Not well matched cases

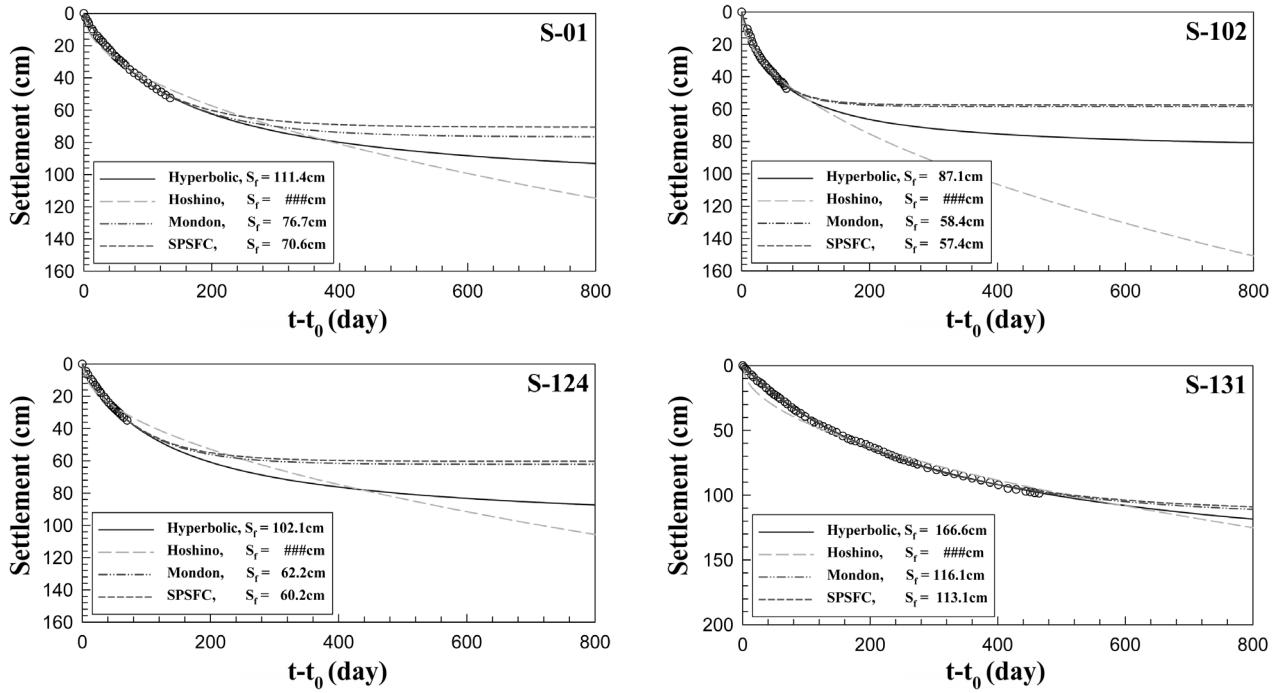


Fig. 12. Results of the settlements predicted by Hyperbolic, Hoshino, Monden, and SPSFC methods (Meeeum site)

## 4.2 미음지구

### 4.2.1 최종침하량 예측

미음지구에서 계측된 시간-침하량 곡선에 대하여 각종 침하량 예측기법을 통해 침하량을 총 9구역에 대해 산정하였다. Fig. 12는 대표적으로 선정된 4개 구역(S-01, S-102, S-124, S-131)의 침하량 산정 결과로 화전지구에서 나타난 결과와 거의 유사한 것을 알 수 있다. Hyperbolic법은 전체적으로 Monden법, SPSFC법보다는 침하량을 크게 예측하고, Hoshino법보다는 침하량이 상대적으로 작게 예측되는 것을 알 수 있다. Hoshino법은 모든 지점에서 예측값이 상식적인 값을 초과하여 너무 크게 침하를 예측하였다.

Fig. 13은 전체 구역에 대한 최종침하량을 도시한 것으로 Hoshino법으로 예측된 최종침하량의 분포는 매우 산만하고 너무 커 그림에 표시되지 않았다. Hyperbolic법, Monden법과 SPSFC법으로 예측된 최종침하량의 분포 범위는 서로 비슷하게 분포되어 SPSFC법이 침하량 예측에 사용될 수 있음을 보여준다.

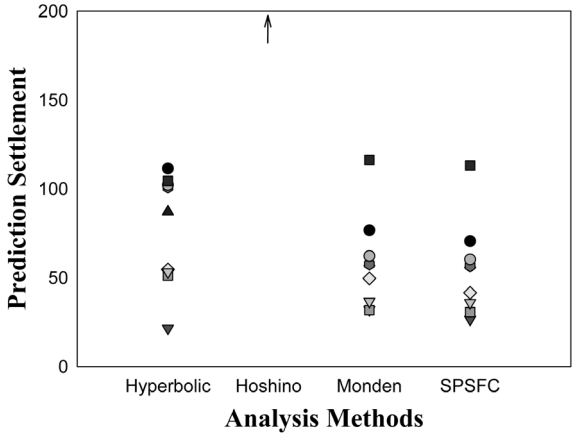


Fig. 13. Predicted final settlements (Meeeum site)

Fig. 14는 현재 침하량 예측에 많이 사용되고 있는 Hyperbolic 법을 기준으로 상대적인 침하량 분산도를 알아보기 위해 도시한 그림이다. Hoshino법은 분산이 커 그림에 표시할 수 없었다. Monden법과 SPSFC법은 Hyperbolic법에 비해 평균적으로 각각 0.68, 0.63배 작게 침하량을 예측하였다. 일관성 측면에서 보면 Monden법과 SPSFC법이 매우 우수함을 알 수 있다.

Fig. 15~Fig. 17은 Hoshino법을 제외한 나머지 예측법과의 상관관계를 알아보기 위해 도시한 결과이다. Fig. 15는 기존에 많이 사용되고 있는 Hyperbolic법과 SPSFC법의 상관관계 결정계수 $R^2$가 0.974로 화전지역보다도 더 높은 상관관계를 보이고 있어 SPSFC법의 신뢰성이 높음을 간접적으로 재확인할 수 있다. Fig. 16에서 알 수 있듯이 Hyperbolic법과 Monden법의 상관관계 결정계수 $R^2$가 0.960으로 하전지역과 같은 경향으로 SPSFC법보다는 조금 낮은 수치를 보였다. Fig. 17에서는 Monden법과 SPSFC법의 상관관계 결정계수 $R^2$가 0.983 값을 보이고 있어, 두 방법이 매우 비슷한 값을 예측할 뿐만 아니라 상관성도 매우 높음을 알 수 있다.

Fig. 18에서 RMSE 값은 Monden법, Hyperbolic법, SPSFC법, Hoshino법 순으로 각각 0.15, 0.33, 0.61, 4.22로 산정되었으며, Hoshino법을 제외한 다른 방법들은 RMSE 값들의 차이가 작아 각 방법들 간의 최종침하량 예측에는 미비한

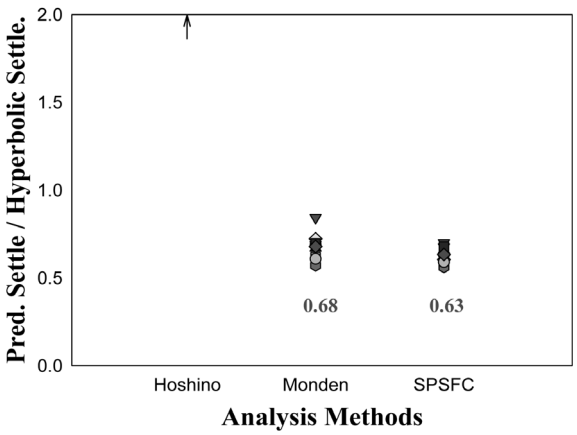


Fig. 14. Comparison of the final settlements based on the Hyperbolic method (Meeeum site)

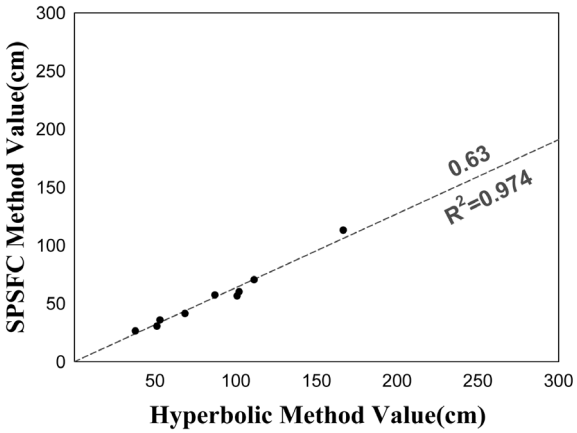


Fig. 15. Settlement correlation between Hyperbolic and SPSFC methods (Meeeum site)

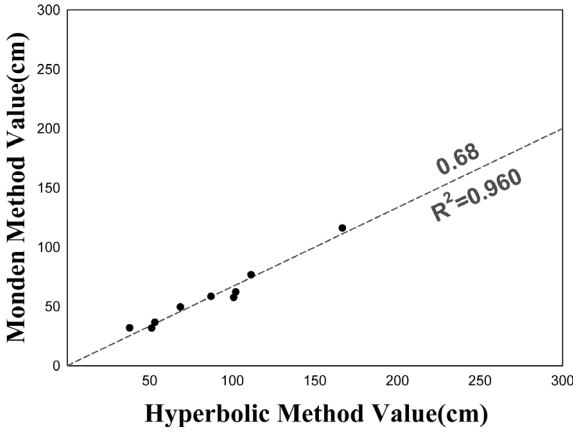


Fig. 16. Settlement correlation between Hyperbolic and Monden methods (Meeeum site)

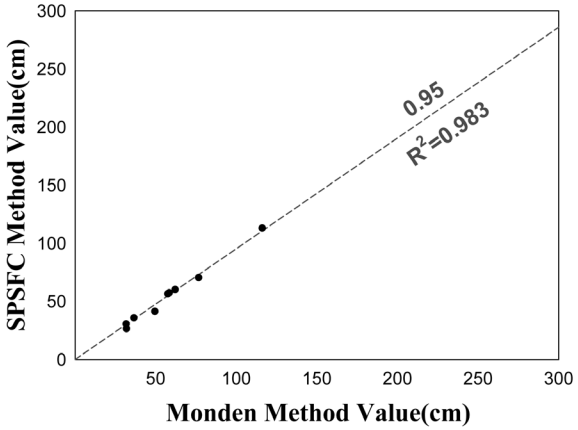


Fig. 17. Settlement correlation between Monden and SPSFC methods (Meeeum site)

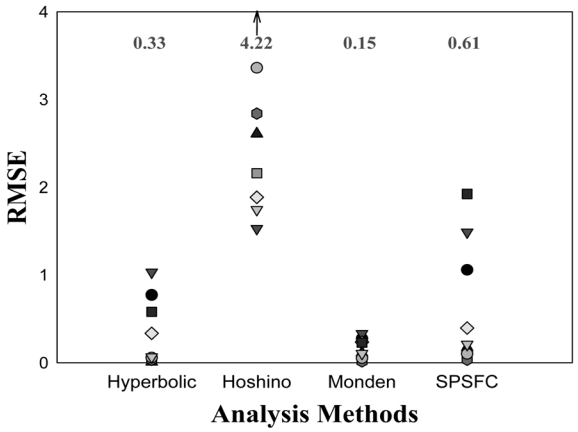


Fig. 18. Results of RMSE analysis (Meeeum site)

영향을 줄 것으로 판단된다.

Fig. 12~Fig. 18의 결과를 종합해 보면 화전지구에서 얻은 결론과 같이 제안된 SPSFC법이 다른 기존의 침하예측법과 비교 시 충분한 신뢰성을 가지고 있어 SPSFC법으로 최종침하량를 예측하는데 큰 문제가 없음을 알 수 있다.

#### 4.2.2 초기 단계성토에서 침하량 예측

전체적으로 화전지구에서와 같은 결론을 얻었다. Fig. 19는 선택된 2개 구역의 결과로 단계성토별 시간-침하량 곡선이 현장 계측값과 잘 일치함을 볼 수 있다. 이는 SPSFC법으로 단계성토별 시간-침하량 곡선 예측이 유용하게 사용할 수 있음을 보여주는 자료이다. 대부분의 구역에서 SPSFC법으로 예측된 값이 현장 계측값과 잘 일치하나 일부 구역에서는 SPSFC법을 이용한 예측침하량이 계측값과 잘 맞지는 않는 경우도 발생하였다.

Fig. 20은 예측된 시간-침하량 곡선이 현장 계측치와 매우 상이함을 보여 주는 예이다. 화전지역과 동일하게 예측값과 계측값의 차이의 원인은 현장 침하량 계측 자료가 성토하중에 따라 불규칙한 침하 경향과 성토 초기 침하량 계측의 누락으로 볼 수 있다.

성토하중에 따른 시간-침하 곡선의 더 정확한 예측을 위해서는 현장 여건상 다소 어려움이 있더라도 드레인 타설을 위한 샌드맷 포설 전 침하량 계측 및 성토에 따른 지중 응력 변화 계측이 시공관리를 위해 꼭 필요할 것으로 판단되어진다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 배수재가 시공된 연약지반에서 성토에 따른 침하량을 예측할 수 있는 수평배수이론이 적용된 SPSFC법을 제안하였다. 제안된 방법은 낙동강 하구 지역에 위치하는 두 개 지역에서 침하계측자료를 사용하여 1) 최종침하량 산정과 2) 초기 단계성토 단계에서 침하량 예측을 통해 검증이 실시되었다.

대상 지역에서 계측된 시간-침하량 곡선에 대하여 각종 예측기법을 통해 산정된 최종 침하량에 대해 상대적인 비교 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. SPSFC법이 Hyperbolic법과 Monden법에 비해 최종침하량을 작게 예측하나 각 방법간의 상관성이 신뢰할 수 있는 범위에 분포하고 있어 최종침하량 예측에 SPSFC법을 사용 가능함을 확인하였다.

기존의 예측법으로 재현하기 어려운 단계성토에서 발생되는 시간-침하량 곡선을 SPSFC법을 사용하여 초기 성토단계의 침하를 분석하여 시간-침하량 곡선을 산정한 결과,

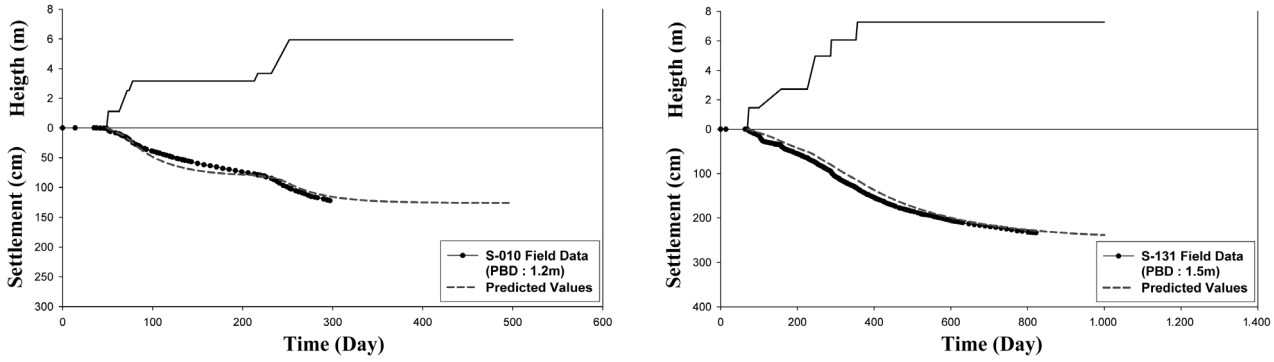


Fig. 19. Comparison the time-settlement curve predicted by the SPSFC method with the measured data (Meeeum site): Well matched cases

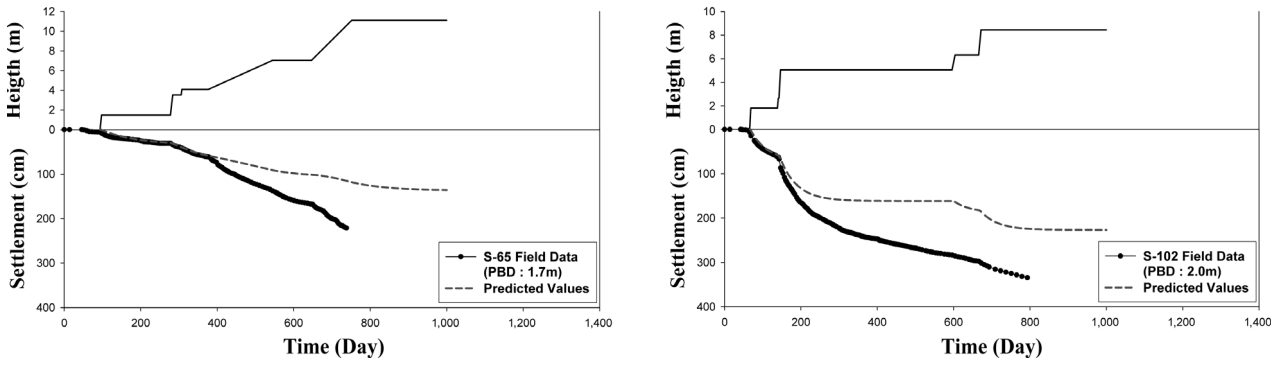


Fig. 20. Comparison the time-settlement curve predicted by the SPSFC method with the measured data (Meeeum site): Not well matched cases

SPSFC법으로 산정된 시간-침하량 곡선은 현장 계측치와 대체로 잘 일치하는 결과들을 보였다. 이러한 결과를 미루어 볼 때, SPSFC법에 의한 단계성토별 시간-침하량 곡선 예측이 현장 시공관리에 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

## References


1. Arulrajah, A., Nikraz, H. and Bo, M. W. (2004), Factors affecting field instrumentation assessment of marine clay treated with prefabricated vertical drains, Geotext. Geomembrs, Vol. 22, No. 5, pp. 415~437.
2. Asaoka, A. (1978), Observational procedure of settlement prediction, Soils and Foundations, JSSMFE, Vol. 18, No. 4, pp. 87~101.
3. Barron, R. A. (1948), Consolidation of fine-grained soils by drains wells, Trans. ASCE, Vol. 113, No. 2346, pp. 718~754.
4. Bo, M. W., Chu, J., Low, B. K. and Choa, V. (2003), Soil improvement : prefabricated vertical drain techniques, Thomson Learning Asia, Singapore, p. 341.
5. Chung, S. G. (1999), Engineering properties and consolidation characteristics of Kimhae estuarine clayey soil, Proc., 11th ARC on SMGE, Special Publication on Thick Deltaic Deposits, ATC-7 Workshop, Seoul, pp. 93~108.
6. Chung, S. G., Kweon, H. J. and Jang, W. Y. (2014), Observational method for field performance of prefabricated vertical drain, Geotextiles and Geomembrane, Vol. 42, No. 4, pp. 405~416.
7. Edil, T. B., Fox, P .J. and Lan, L. T. (1991), Observational procedure for settlement of peat, Proc., Int. Conf. on Geotechnical Engineering for Coastal Development Theory and Practice on Soft Ground, Geo-Coast'91, Yokohama, Japan, pp. 165~170.
8. Hansbo, S. (1979), Consolidation of clay by band shaped prefabricated drains, Ground Eng., Vol. 12, No. 5, pp. 16~25.
9. Hansbo, S., Jamiolkowski, M. and Kok, L. (1981), Consolidation by vertical drains, Geotechnique, Vol. 31, No. 1, pp. 45~66.
10. Hoshno, S. (1962), Problems of foundation s in recent years, Society of Civil Engineering, Vol. 47, No. 7, pp. 63~67.
11. Lee, N. K. and Chung, S. G. (2010), Reevaluation of the factors influencing the consolidation of ground by incorporating prefabricated vertical drains, KSCE J. Civ. Eng., Vol. 14, No. 2, pp. 155~164.
12. Monden, H. (1963), A new time fitting method for the settlement analysis of foundation on soft clays, Menoir Fac. Eng., Hiroshima University, Vol. 20, No. 1, pp. 21.
13. Onoue, A. (1988), Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear into consideration, Soils and Foundations, Vol. 28, No. 4, pp. 165~74.
14. Sridharan, A., Murthy, N. S. and Prakash, K. (1987), Rectangular hyperbola method of consolidation analysis, Geotechnique, Vol. 37, No. 3, pp. 355~368.
15. Tan, T. S., Inoue, T. and Lee, S. L. (1991), Hyperbolic method for consolidation analysis, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 11, pp. 1723~1737.
16. Yoshikuni, H. and Nakanodo, H. (1974), Consolidation of soils by vertical drain wells with finite permeability, Soils and Foundations, Vol. 14, No. 2, pp. 35~46.