

# 조건부 합성 기법을 이용한 굴착 배면 침하량 분포의 정밀 산정

## Accurate Estimation of Settlement Profile Behind Excavation Using Conditional Merging Technique

김 태 식<sup>1)</sup> · 정 영 훈<sup>†</sup>

Taesik Kim · Young-Hoon Jung

Received: May 25<sup>th</sup>, 2016; Revised: June 2<sup>nd</sup>, 2016; Accepted: July 11<sup>th</sup>, 2016

**ABSTRACT** : Ground deformation around construction site in urban area where typically adjacent structures are located needs to be strictly controlled. Accordingly, it is very important to precisely monitor the ground deformation. Settlement beacon is typically employed to measure the ground deformation, but meanwhile the rapid development in electronic technology enables 3D image scanner to become available for measuring the ground deformation profile in usual construction sites. With respect to the profile measurement, the 3D scanner has an advantage, whereas its accuracy is somewhat limited because it does not measure the displacement directly. In this paper, we developed a conditional merging technique to combine the ground displacement measured from settlement beacon and the profile measured by the 3D scanner. Synthetic ground deformation profile was generated to validate the proposed technique. It is found that the ground deformation measurement error can be reduced significantly via the conditional merging technique.

**Keywords** : Settlement, Conditional merging, Excavation, 3D scanner

**요 지** : 도심지와 같이 공사 현장에 인접 구조물이 많은 경우, 지반 구조물의 안정성 확보와 더불어 지반의 변형 역시 엄격하게 관리해야 한다. 따라서 공사 중 현장에서 발생하는 지반의 침하를 정확하게 예측하는 것은 매우 중요하다. 지반의 침하는 침하계를 이용하여 예측하는 것이 일반적이거나, 최근 전자기술의 발달로 3차원 스캐너 가능한 장치들을 지반 침하 계측에 사용하고 있다. 그러나 이 3차원 스캐너장치의 경우 지반 침하의 전체적인 양상을 평가하기는 용이하나 직접 침하를 측정하지 않아 정밀도에 있어서 한계가 있다. 또한, 침하계의 경우 침하계가 설치된 지점에서만 침하값을 측정하기 때문에 전체적인 침하의 양상을 평가하는 데는 한계가 있다. 본 논문에서는 침하계가 측정한 값과 스캐너가 측정한 값을 합성하는 조건부 합성 기법에 대해 연구하였다. 가상의 침하 양상과 이를 바탕으로 가상의 스캐너 침하 양상을 생성시켜 연구를 진행하였다. 조건부 합성을 통해 침하 양상의 오차를 획기적으로 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

**주요어** : 침하, 조건부 합성, 굴착, 3차원 스캐너

## 1. 서 론

지반공학관련 프로젝트를 수행하는 데 있어서 지반 구조물의 안정성 확보와 더불어 지반의 변형도 엄격히 관리해야 하는 경우들이 많이 생겨나고 있다. 특히 도심지와 같이 공사현장 인근에 다른 구조물들이 위치하는 경우, 충분한 안전을 확보는 기본이고 사용성(Serviceability)도 확보해야 한다. 사용성의 확보를 위해서는 설계 단계에서 지반의 변형을 정밀하게 예측해야 하지만 현실적으로 지반의 비균질성 및 이방성으로 인해 강성을 정확하게 평가하기가 어렵다. 따라서 본질적으로 정확하게 평가하기 어려운 지반의 강성 값을 이용하여 공사 중 지반의 변형을 정확하게 예측한다는

것은 한계가 있을 수밖에 없다.

이러한 문제를 극복하기 위해서는 공사 중 현장에서 발생하는 지반의 침하 변위량을 정확하게 예측하는 것이 아주 중요하다. 일반적으로 지반의 침하 변위량은 다수의 침하계(Settlement beacon)를 설치하고 이를 주기적으로 계측함으로써 알 수 있다. 그러나 침하계는 침하계를 설치한 지점의 개별 침하량은 정확하게 예측할 수 있지만 전체적인 침하 양상(Settlement profile)을 파악하기 위해서는 별도의 해석이 필요하다. 즉 개개의 측정 값으로 3차원적인 지반의 침하 양상을 정밀하게 판단하는 것은 여러 가지 제한이 따른다.

3차원 스캐너 영상 정보를 통해 물체 외곽선의 좌표를 추출하고 이 좌표를 이용해 다각형을 구성하여 물체의 형상

1) Department of Civil Engineering, Hongik University

† Department of Civil Engineering, Kyung Hee University (Corresponding Author : jyounghoon@khu.ac.kr)

을 재구성하는 기술을 말한다. 최근 각종 전자기술의 발달로 3차원 스캔이 가능한 장치들이 개발되고 있다. 또한, 고해상도 디지털 카메라를 이용하여 여러 각도에서 다수의 디지털 이미지를 획득한 후, 이를 3차원으로 합성할 수 있으며 이를 통해 지반의 침하 양상을 평가할 수 있다. 또한, 라이더(Lidar)를 이용하면 레이저로 지반을 스캔하여 지반의 침하 양상을 평가할 수 있다. 이런 스캔장치를 이용할 경우 표면의 높낮이 데이터 또는 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)을 얻을 수 있으므로 지반 침하의 전체적인 형태를 비교적 정확하게 얻을 수 있으나 직접적으로 침하 변위량을 측정하는 것은 아니므로 정밀도에 한계가 있다.

본 논문에서는 개개의 측정에서 침하계를 이용하여 측정하는 전통적인 침하량 측정 방법과 고해상도의 3차원 스캐너 측정 방법이 병행되었을 경우 두 가지 방법으로 얻은 데이터를 합성하여 충분한 정밀도를 가진 침하 변위량 프로파일을 획득하는 기법에 대해서 연구하였다. 가상의 굴착 배면의 지반 침하 양상을 생성하였고, 이 값을 참값으로 가정 후 임의의 침하계 위치에서 얻은 개별 측정값과 지반 침하 양상을 조건부 합성(Conditional merging) 기법을 이용하여 합성하였다.

## 2. 조건부 합성

조건부 합성(Conditional merging)은 수자원 및 기상분야에서 정확한 강우량 산정을 위해 사용하는 기법이다. 강우레이더를 이용하여 측정된 강우량의 분포패턴과 우량계

를 이용하여 직접 측정된 강우량을 합성하는 데 사용한다(Sinclair & Pegram, 2005). 이 방법을 지반공학 분야에 응용한다면 도심지 굴착 문제에서 각각의 침하 측정점에서 측정된 값으로는 파악하기 어려운 지반 침하의 전반적인 양상을 알 수 있다. 또한, 침하 양상은 알 수 있으나 정확히 변위 자체를 측정된 값이 아니므로 발생하는 3차원 스캔의 근본적 한계를 극복할 수 있다.

조건부 합성에는 지질 통계학적 접근 방법인 크리깅(Kriging) 기법이 사용된다. 크리깅 기법은 공간 분포상에서 해당 지점에 정확한 변수값이 없을 때 내삽을 통해 변수값을 추정하는 지질 통계학적 접근 방법이다.

Fig. 1은 Sinclair & Pegram(2005)이 설명한 조건부 합성의 과정을 나타낸다. Fig. 1(a)에 표시한 값들은 x축에 표시한 각각의 침하계 위치에서 측정된 개별 침하량이라고 하자. 이 값을 크리깅하여 지반 침하의 공간분포를 계산하면 Fig. 1(b)와 같은 침하량 분포를 얻을 수 있다. 이와 별도로 스캐너를 이용하여 지표를 스캔한 후 얻은 수치표고모델(DEM)이 Fig. 1(c)와 같다고 하자. DEM에서 침하계 위치에 해당하는 표고 수치를 추출하고 이 데이터만을 이용하여 크리깅을 실시하면 Fig. 1(d)와 같은 공간분포를 계산할 수 있다.

Fig. 1(c)의 실제 측정된 DEM 데이터와 Fig. 1(d)의 크리깅을 이용하여 얻은 데이터 간의 차이, 즉 오차량을 표시하면 Fig. 1(e)의 짧은 선과 같다. 이 오차량을 앞서 Fig. 1(b)의 데이터에 대해 동일하게 적용하면 Fig. 1(f)와 같이 표시할 수 있으며, 이 오차량을 반영하여 다시 크리깅한다면 Fig. 1(g)와 같은 보다 현실적인 침하량 분포를 얻을 수 있다.

## 3. 가상데이터에 대한 기법 적용

### 3.1 가상의 굴착 배면 침하 변위량

조건부 합성을 적용하기 위해 가상의 3차원 지반 침하 양상을 만들었다. 이를 위해 Hsieh & Ou(1998)와 Finno & Roboski(2005)가 제안한 굴착 배면의 침하 양상을 이용하였다. Hsieh & Ou(1998)는 다수의 굴착 현장에서 측정된 값을 바탕으로 Fig. 2와 같은 2차원 지반 침하 양상을 제안하였다. 여기서  $H_e$ 는 굴착 깊이,  $d$ 는 굴착지 벽체로부터의 거리,  $\delta$ 는 침하량,  $\delta_{vm}$ 은 최대 침하량을 나타낸다.

3차원 굴착 배면의 침하 양상을 얻기 위해서는 2차원 지반 침하 양상을 3차원으로 바꿀 필요가 있다. Finno & Roboski(2005)에 따르면 Fig. 3에 나타난 바와 같이 굴착 폭의 중심부에서 최대 침하량이 나타나고, 굴착 폭의 양 끝단으로 갈수록 침하량이 감소하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는

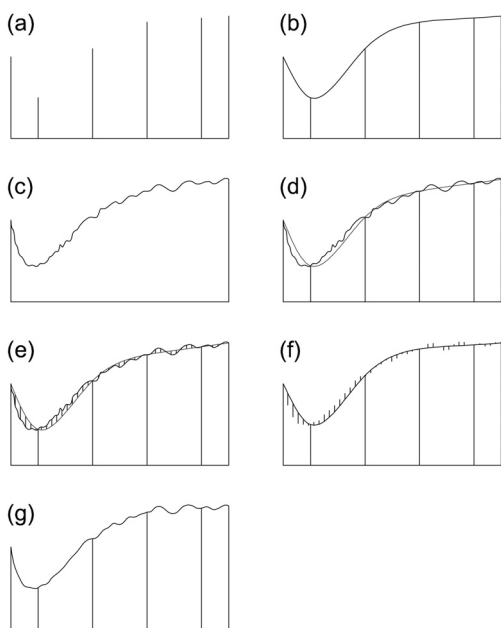


Fig. 1. Conditional merging process

이러한 양상을 반영하기 위해 Finno & Roboski(2005)가 제안한 오차함수(Error function)를 이용한 방법을 사용하였다. Eq. (1)은 오차함수를 이용한 식을 나타내며 여기서  $A=0.015+0.035\ln\frac{He}{L}$ 를 의미한다. L은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 굴착의 폭이다.

$$\delta(x) = \delta_{\max} \cdot \left( 1 - 0.5 \operatorname{erfc} \left( \frac{2.8(x + L \cdot A)}{0.5L - L \cdot A} \right) \right) \quad (1)$$

본 연구에서는 굴착 깊이 20m, 굴착 폭 20m, 최대 배면 침하량 10cm로 가정하고 가상의 배면 침하 양상을 만들었다. 이 조건에서 굴착의 영향범위는 Hsieh & Ou(1998)의 제안에 따라 굴착 벽체로부터 80m로 가정하였다. 가정된 영역에서 등간격으로 배치된 총 451개의 위치점을 가정하였고 이 위치에서 Hsieh & Ou(1998)의 침하 분포와 Finno & Roboski(2005)의 방법을 적용하여 데이터를 생성하였다. Fig. 4는 이러한 방법을 통해 합성된 굴착 배면의 3차원 침하량 분포도이며, Fig. 5는 2차원 등고선도를 보여준다.

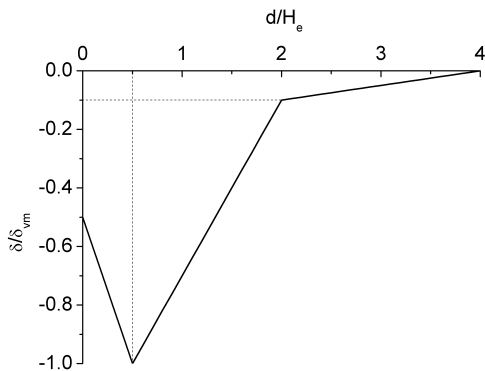


Fig. 2. Settlement profile proposed by Hsieh & Ou (1998)

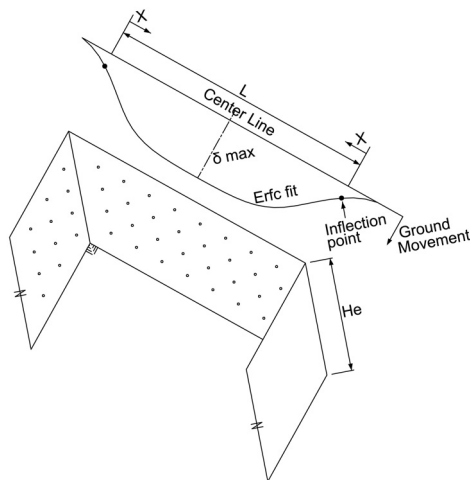


Fig. 3. Settlement profile estimation in 3D using error function distribution (Redrawn from Finno & Roboski, 2005)

### 3.2 굴착 배면 침하량의 3차원 스캔

Fig. 5에 보인 가상의 굴착 배면 침하 양상을 참값으로 가정한다면 이를 이용하여 가상의 굴착 배면 침하량의 3차원 스캔 자료를 만들 수 있다. Fig. 5를 생성하기 위해 2m×2m 간격으로 배치한 451개의 측정점 위치에서 얻은 침하량의 참값에 평균 20%의 오차가 무작위적으로 분포하도록 새로운 침하 양상을 생성시킨 후 이를 3차원 스캔으로 얻은 지반 침하량 프로파일이라고 가정하였다. Fig. 6은 3차원 스캔으로 얻은 지반 침하량의 등고선을 나타낸다. Fig. 6의 분

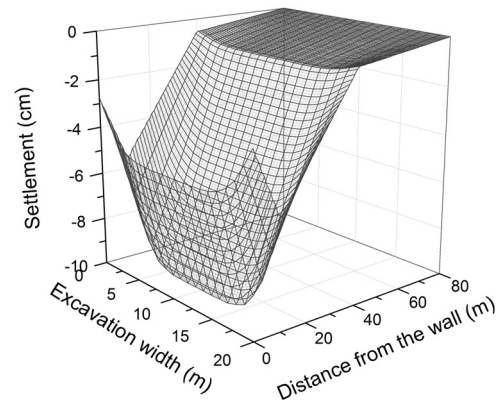


Fig. 4. Synthetic settlement profile

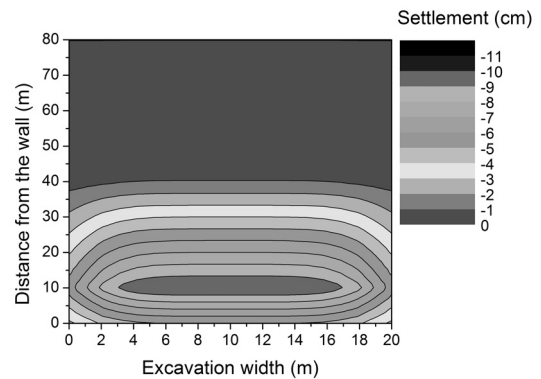


Fig. 5. Contour of synthetic settlement profile

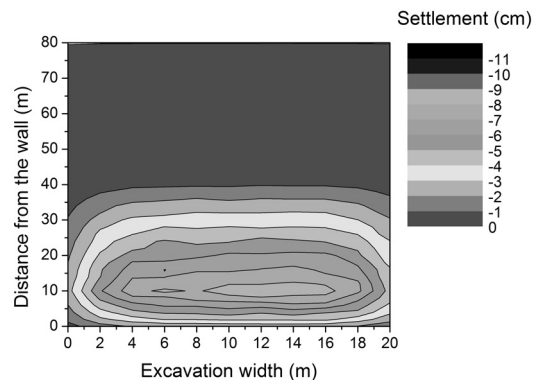


Fig. 6. Contour of synthetic scanned settlement profile

또는 참값에 오차가 포함되어 있으므로 Fig. 5의 침하량 분포와 유사하지만 정확히 일치하지는 않는다.

### 3.3 조건부 합성

등간격으로 분포된 제한된 숫자의 측정점을 가정한 후 이 위치에 해당되는 침하량의 참값을 Fig. 5의 데이터에서 추출하여 침하계 측정값으로 산정하였다. Fig. 7은 10개의 측정점에서 얻은 침하량 값으로 크리깅했을 때의 등고선을 나타낸다.

Fig. 7에 사용된 10개의 침하계의 동일 위치에서 Fig. 6을 이용하여 3차원 스캔으로 얻은 침하량을 추출하였다. 이 추출한 값을 크리깅하여 Fig. 8에 나타내었다.

여기서 Fig. 6과 Fig. 8의 침하량 간의 오차를 계산한 후 Fig. 7의 분포에 적용하여 조건부 합성을 실시할 수 있다. Fig. 9는 조건부 합성으로 얻은 침하량 분포를 나타낸다.

앞서 설명한 조건부 합성 기법으로 얻은 Fig. 9의 침하량 분포는 Fig. 5의 침하량 참값의 분포와 매우 유사하다. 정량적으로 조건부 합성의 정밀도를 확인하기 위해 오차량을 계산하였다. 오차는 전체 대상 영역에서 Fig. 5에서 얻을 수 있는 침하량 참값과 Fig. 9의 조건부 합성으로 산정된 침하량 간 차이의 절대값을 구한 후 산술 평균을 취하여 산정하

였다. 또한, 앞서 Fig. 7~9를 통해 설명한 10개의 측정점에 대한 오차량과 함께 20, 40, 80, 255, 451개의 측정점 수를 가정하여 조건부 합성 기법을 적용한 후 오차량을 구하였다. Fig. 10은 관측점 개수에 따른 오차량의 변화를 보여준다.

10개의 측정점에서 얻은 침하량만을 가지고 크리깅할 경우 오차량은 약 11%였으나, 조건부 합성 기법을 이용할 경우 오차량은 4%대로 감소된다. Fig. 9에 보인 바와 같이 침하계의 개수가 증가하면 조건부 합성 기법으로 구한 침하량의 오차도 크게 감소한다. 측정점의 숫자가 침하량 참값을 생성시킬 때 사용된 위치점의 숫자인 451개와 동일할 때 오차는 0에 수렴하며 조건부 합성 계산 절차가 타당함을 확인할 수 있다.

## 4. 결과 분석 및 토의

본 연구에서는 굴착 깊이 20m, 굴착 폭 20m, 최대 배면 침하량 10cm로 가정하여 분석을 실시하였다. 동일한 조건에서 최대 배면 침하량을 원래 조건의 1/2배인 5cm와 원래 조건의 2배인 20cm의 경우에 대해서도 분석을 실시하였다. 분석 결과 최대 배면 침하량에 비례해서 오차의 크기가 변

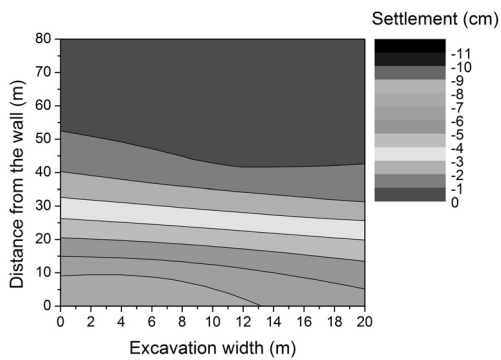


Fig. 7. Kriged settlement contour from 10 settlement beacons

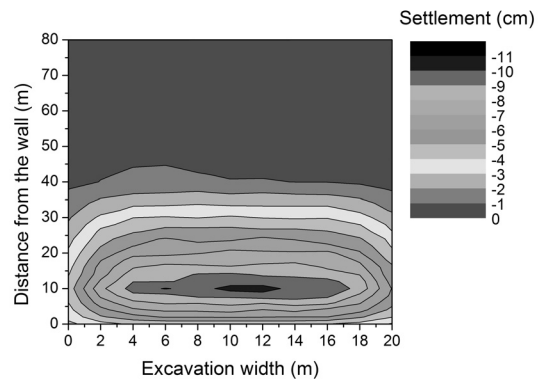


Fig. 9. Contour of conditionally merged settlement profile

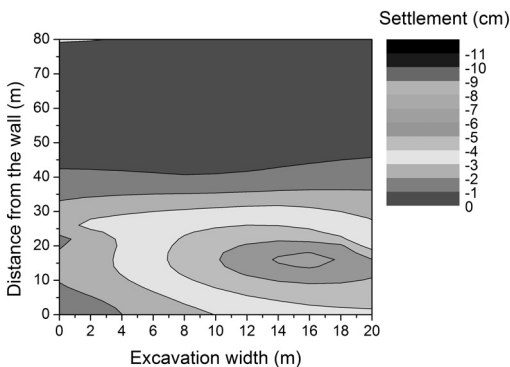


Fig. 8. Kriged scanned settlement contour from the locations of 10 settlement beacons

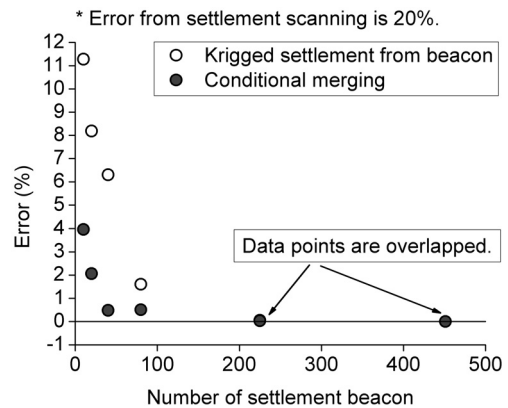


Fig. 10. Number of settlement beacon vs. Error

하는 것으로 나타났다. 즉 최대 배면 침하량이 변하더라도 동일한 비율로 오차가 변하게 된다. Fig. 11은 침하량을 1/2배와 2배로 변화시켰을 때의 조건부 합성의 백분율 오차를 나타낸다. Fig. 11에 나타난 바와 같이 백분율 오차(%)는 Fig. 10과 동일한 것으로 나타났다.

최대 배면 침하량은 10cm로 고정된 상태에서 굴착 깊이 및 굴착 폭을 원래 조건의 1/2배인 10m인 경우와 원래 조건의 2배인 40m인 경우에 대해서도 분석을 실시하였다. Fig. 12와 Fig. 13은 각각의 경우에 대한 가상의 배면 침하 양상을 나타낸다. 등고선도 작성을 위해 배치한 측정점의 개수

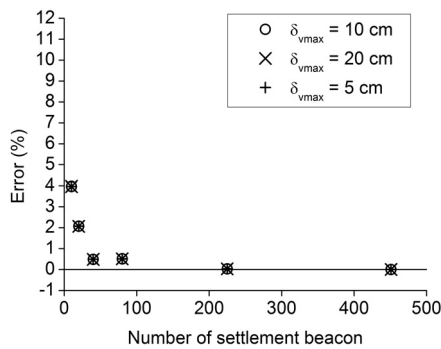


Fig. 11. Errors of conditional merging in accordance with various settlement

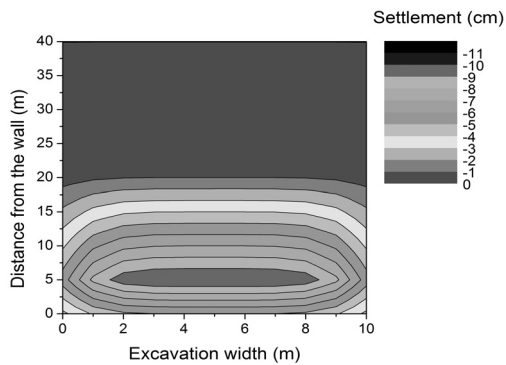


Fig. 12. Contour of synthetic settlement profile : width 10 m and depth 10 m

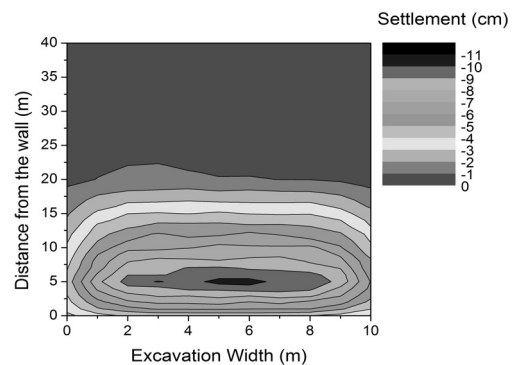


Fig. 14. Contour of conditionally merged settlement profile : width 10 m and depth 10 m

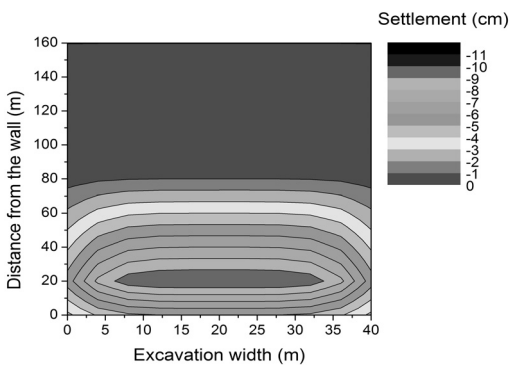


Fig. 13. Contour of synthetic settlement profile : width 40 m and depth 40 m

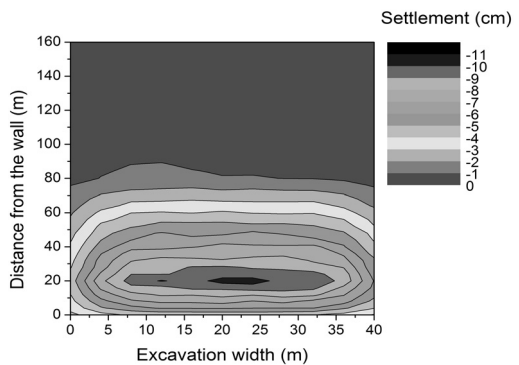


Fig. 15. Contour of conditionally merged settlement profile : width 40 m and depth 40 m

는 앞서 설명한 Fig. 5의 작성방법과 동일하게 451개를 사용하였으며, Fig. 12의 측정점 배치 간격은 1m×1m, Fig. 13의 측정점 배치 간격은 4m×4m로 설정하였다. 동일한 개수의 측정점에 대해서 배치 간격만 균일하게 증가하였으므로 등고선도의 양상이 Fig. 5와 동일한 것으로 나타났다.

Fig. 14와 Fig. 15는 “3.3 조건부 합성”에서 보인 경우와 동일한 방법으로 조건부 합성을 실시한 결과이다. 굴착 폭과 벽체로부터의 거리만 상이할 뿐 침하 분포 양상은 Fig. 14와 15가 동일한 것으로 나타났다. 또한, 이 분포 양상은 앞서 Fig. 9에서 보인 침하 분포 양상과도 동일한 것으로 나타났다.

배면 침하 양상을 위해 사용된 위치점의 개수가 동일한 상황에서 위치점의 간격만 동일한 비율로 확대, 축소하면 침하 분포 양상도 동일한 비율로 확대, 축소됨을 확인할 수 있었다. 따라서 상기와 같은 조건일 경우 조건부 합성의 백분율 오차는 Fig. 16과 같이 굴착 영역의 크기에 관계없이 동일한 것으로 나타났다. 또한, 이는 Fig. 10과도 동일한 것으로 나타났다.

본 연구에서는 451개 위치점을 가정하고 이 위치점에서의 침하량 값을 기존 연구자들의 제안식에 따라 산정하여 침하 양상을 합성하였다. 최대 침하량, 굴착 폭, 굴착 깊이

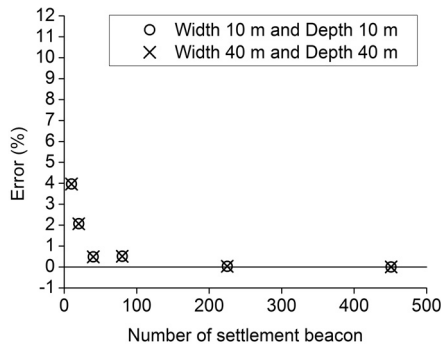


Fig. 16. Errors of conditional merging in accordance with influence area of excavation

와 조건부 합성에 관한 관계를 분석해보았으나 합성에 사용된 위치점의 개수의 변화가 조건부 합성에 미치는 영향에 대해서는 분석이 이루어지지 않았다. 추후 이 부분에 대한 평가가 이루어져야 할 것으로 판단한다. 또한, 제안식을 이용한 합성 침하량 분포가 아닌 실제 측정을 바탕으로 한 연구가 수반되어야 할 것으로 판단된다.

지반의 침하 분포 양상을 실제 현장에서 측정하기 위해서는 해당 지반의 지표에 지장물이 없는 환경에서 측정을 해야 한다. 예를 들어 해당 지표에서 건설 장비가 움직이거나 건설 자재들이 적재되어있다면 스캔을 통해 지반의 침하를 측정하기 어려우므로 유의해야 할 것으로 판단한다. 다수의 고해상도 디지털 이미지를 이용하여 3차원으로 합성할 경우 그림자, 빛의 각도 등에 영향을 받을 수 있으므로 기상조건에 유의해야 할 것으로 판단한다.

조건부 합성을 위해서는 기존의 침하 측정방식에 추가로 스캔작업이 실시되어야 한다. 경제성을 고려했을 때 도심지와 같이 지반의 변형이 주변 구조물에 치명적인 영향을 미칠 경우 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 각각의 측정에서 침하계를 이용하여 측정한 값과 3차원 스캐너를 이용하여 얻은 침하량 분포를 합성하여 예측의 정밀도를 향상시킬 수 있는 조건부 합성 기법을 평가하였다. 각각의 개별 침하계로 평가하기 어려웠던 정밀한 침하량 분포를 3차원 스캐너 데이터와 조건부 합성 기법을 이용하여 얻을 수 있었다. 이러한 방법은 3차원 스캐너로 얻은 침하량 분포의 낮은 정밀도를 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 조건부 합성 기법에서 침하계의 개수에 따라 합성된 침하량 값의 정밀도가 향상되는 것을 확인하였다. 향후 지반의 침하를 정확히 예측해야 하는 현장에서 충분한 숫자의 침하계와 3차원 스캐너를 병행하여 사용한다면 조건부 합성 기법을 이용하여 예측 정밀도를 획기적으로 향상시킬 수 있을 것으로 판단한다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(14CTAP-C078832-01)에 의해 수행되었습니다.

## References

1. Finno, R. J. and Roboski, J. F. (2005), Three-dimensional responses of a tied-back excavation through clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 3, pp. 273~282.
2. Hsieh, P-G. and Ou, C-Y. (1998), Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 35, No. 6, pp. 1004~1017.
3. Sinclair, S. and Pegram, G. (2005), Combining radar and rain gauge rainfall estimates using conditional merging, *Atmospheric Science Letters*, Vol. 6, No. 1, pp. 19~22.