

## 철도 노반 부설 후 성토부 잔류침하발생에 관한 통계적 분석

### Statistical analysis of residual settlement on embankment after constructing railway roadbed

이세희\*, 조국환†

Se-Hee Lee\*, Kook-Hwan Cho†

**Abstract** The roadbed's residual settlement is being regulated in the railway design standard, which is mainly from the up-lift limitation using pad for maintenance. This research tries to figure out reasons of residual settlements over 25mm after embankment construction. Total 408 data have been collected and analyzed to investigate relationships between SPT-N-Value, the depth of soft ground, and the height of embankment and soil types. The research result shows that the most influential factor on residual settlement is the embankment height. The probability of the residual settlement which is more than 25mm is about 25% when the embankment height is higher than 10m. However, the correlations in soil type, SPT-N value, soft ground depth, with residual settlement are not strong enough to confirm.

**Keywords** : Railway roadbed, Settlement, Correlation, Residual settlement, Embankment

**초 록** 철도 노반 부설 후 체결장치 보수조정 한계 등으로 인하여 노반 잔류침하 기준을 철도설계지침에 규정하여 관리하고 있다. 그 중 토공 구간에서 기준치를 넘는 개소가 다수 발생하였으며, 이에 잔류침하 발생의 원인을 규명하고자 하였다. 본 연구에서는 총 408개의 Data를 수집한 후 성토높이, 지반조건, N치, 연약지반의 깊이 등과 침하량의 상관관계를 분석하였다. 분석결과 잔류침하에 가장 큰 영향을 미치는 것은 성토높이로 나타났다. 특히 성토높이가 10m 이상인 경우에 잔류침하 발생확률이 25% 이상이 되는 것으로 분석되어 시공시 세심한 주의가 필요한 것으로 나타났다. 그러나 연약지반의 종류, 깊이, 강도 등은 상대적으로 잔류침하와의 큰 상관관계가 존재하지 않는 것으로 분석되었다.

**주요어** : 철도 노반, 침하량, 상관관계, 잔류침하, 성토고

## 1. 서 론

열차고속화에 따라 안정한 노반 및 선로형태가 요구되면서 자갈 궤도에 비해 자체강성 및 저항력이 큰 콘크리트 궤도 부설이 일반화 되어가고 있는 추세이다. 자갈 궤도와 달리 콘크리트 궤도는 궤도를 지지하는 TCL층과 HSB층이 강성 구조로, 이 층들을 지지하는 성토체와 원지반에서의 침하 발생을 기본적으로 허용하지 않는 궤도구조 형식이다[1]. 그러나 토공구간은 유독 타구간에 비해 원지반과 노반 침하에 취약한 형태를 띠고 있어, 고속철도기준에서 총 허용 잔류침하량을 엄격하게 관리하고 있다. 철도노반이 연약지반으로 구성되는 경우 흙의 압축성에 의해 즉시침하, 1차 압밀침하, 2차 압축침하 등이 발생한다.

\* 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과

† 교신저자: 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수(khcho@seoultech.ac.kr)

일반적으로 원지반의 침하 발생시 초기에 과잉간극수압이 소산되면서 1차 압밀현상이 일어나며, 그 후 유효응력 하에 흙이 재배열되어 2차 압축침하가 나타난다. 이때 2차 압축침하는 장기적 거동을 함으로써 노반의 잔류침하를 유발한다. 이에 노반 잔류침하에 발생원인을 찾고자 여러 관점에 연구들이 수행되었다. 이일화 외(2015)는 콘크리트 궤도 토공구간을 대상으로 지하수위 변동이 침하에 미치는 영향에 대한 연구를 진행하였고, 이성진 외(2014)은 콘크리트 궤도 노반 침하와 다짐 함수비의 관계를 입증하는 등 노반의 영향요소에 관련한 연구가 진행되었으나 지반강도와 성토고 높이 등 지반상태를 평가하는 요소들 역시 잔류침하에 영향을 미치므로 또 다른 관점에 대해 이야기하고자 본 연구를 아래와 같이 수행하였다.

## 2. 철도 노반 허용기준 및 영향요소 선정

### 2.1 허용 잔류침하량 및 연약지반 판정기준

한국철도시설공단에서는 철도 노반 부설시 토공구간에서의 침하를 방지하기 위하여 허용 잔류침하량, 성토고 높이 및 연약지반 판정기준 등을 설계지침에 제시하여 관리하고 있다. 허용 잔류침하량은 총 30mm 이내로 노반 인수인계 후 열차하중에 의한 침하량 5mm, 원지반 침하량과 성토체 침하량 및 궤도구조에서의 침하량 25mm로 유지보수 기준을 제시하고 있다. 연약지반 판정을 아래 Table 1과 같이 표준관입시험 N치 값으로 기준을 제시하고 있다.

Table 1 The criterion of soft ground

구분	점성토 및 이탄질 지반		사질토 지반
층두께	10m 미만	10m 이상	-
N치	4 이하	6 이하	10 이하

### 2.2 지반개량을 위한 주요 연약지반처리공법

위와 같이 지반조사에 따른 연약지반을 판정한 후 처리가 필요한 지반은 아래 Table 2와 같이 지반을 개량할 것을 권고하고 있다.

Table 2 The classification of soil improvement method

개량원리	주요공법	개량목적	적용지반
치환	치환공법	활동파괴의 방지, 침하의 감소, 지반전단변형의 억제	점성토, 유기질토
탈수	Preloading공법	압밀침하촉진	점성토
	Sand drain공법		유기질토
	Well point공법	활동파괴의 방지	사질토
다짐	Vibroflotation공법	침하의 감소, 액상화의 방지	사질토
고결	동결공법	지반의 Piping 방지, 침하감소	점성토, 사질토
차수	약액주입방법	지반토 축방유동방지, 차수	사질토

### 2.3 성토부 침하 따른 영향요소 선정

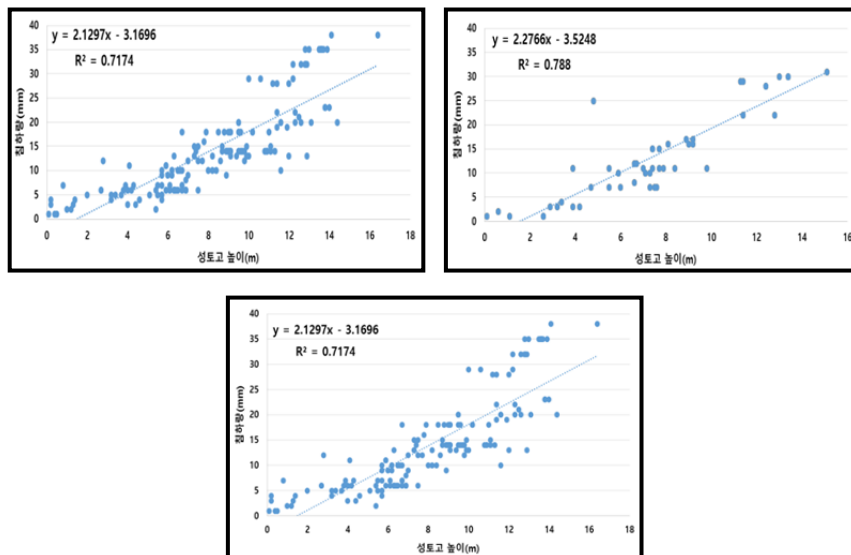
성토구조물의 침하는 원지반 침하, 성토체 침하, 열차운행하중에 의한 침하로 나눌 수 있다. 그 중 원지반 침하는 지반강도와 그에 따른 연약지반층을 이루는 범위 등에 따라 발생하며, 성토체 침하는 성토체 층의 두께, 성토 재료, 다짐작업에 좌우된다. 그러나 열차운행하중에 의한 침하는 하부노반으로 까지 영향범위가 다른 침하에 비해 작다. 이에 따라 전체적인 흙의 성질에 따라 무처리지반(사질토, 점성토)과 처리지반으로 구분하였으며, 원지반과 성토체의 침하에 미치는 영향으로 성토고와 지반강도(N치) 및 연약지반 깊이를 선정하였다.

### 3. 성토부 침하영향요소에 따른 침하량 상관관계 통계 분석

본 연구는 그 동안 건설된 철도 노반에서 연약지반과 연관성이 있는 데이터를 수집하였으며, 성토부 데이터는 총 408개가 분석되었다. 지반재료에 따라 무처리지반 중 사질토는 175개, 점성토는 73개, 처리지반으로는 160개로 분류할 수 있었다. 또한 잔류침하 발생원인을 분석하기 위하여 성토고, N치, 연약지반 깊이를 영향인자로 분류하였다. 이에 철도노반을 지지하는 지반재료 및 영향요소와 침하량의 상관관계를 통계·분석하여 침하에 직접적인 영향을 주는 인자를 알아보고자 하였다.

#### 3.1 성토고에 따른 잔류침하 경향

성토체 층의 두께에 따라 침하가 좌우되므로 성토고는 중요한 영향인자이다. 성토고에 따른 잔류침하량을 분석한 결과 허용침하량을 초과하는 데이터는 사질토의 경우 175개 중 21개로 초과비율이 12%, 점성토의 경우 73개 중 9개로 초과비율이 12%, 처리지반의 경우 160개 중 13개로 초과비율이 8%를 차지했다. 전체적인 잔류침하 경향은 아래 Fig. 1과 같이 성토고가 낮을수록 침하량이 작게 발생하고, 성토고가 높을수록 침하량은 커지는 경향을 볼 수 있다.



(a) The case by sandy soil

(b) The case by cohesive soil

(c) The case by improved ground

Fig. 1 The graph for correlation embankment with settlement

### 3.1.1 성토고(연약 무처리지반)과 잔류침하량의 상관관계

Fig. 2와 같이 노반 잔류침하량 기준값(25mm 이하)에 대한 초과빈도수를 막대그래프로 나타내었다. 여기서 사질토일 때 10m를 기점으로 16m까지 기준치를 초과하는 비율은 25~100%이며, 점성토일 때 11m를 기점으로 15m까지 기준치를 초과하는 비율은 33~100%를 차지하였다. 따라서 성토고의 높이는 무처리 지반일 때 10m 이상부터 시공시 주의 깊게 고려해야 할 것으로 판단된다.

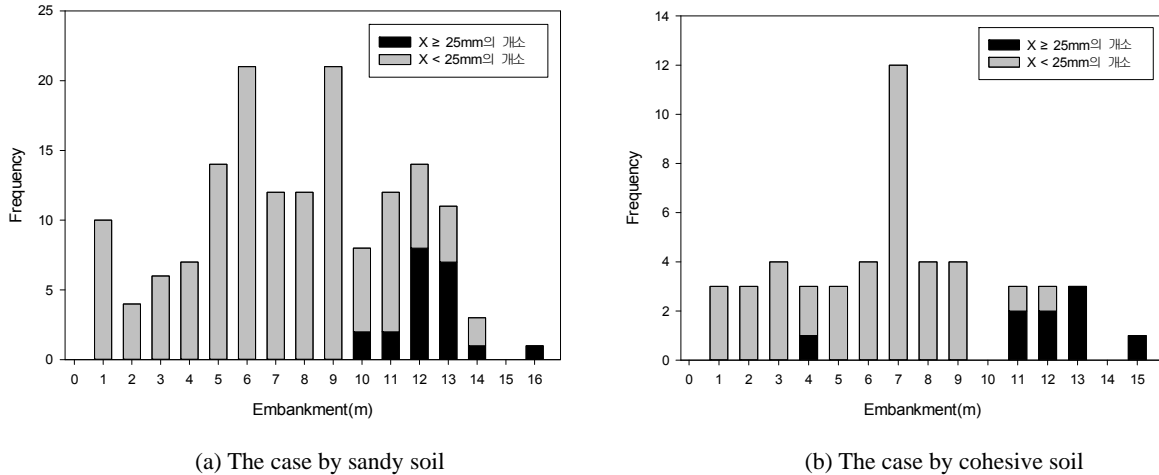


Fig. 2 The graph for correlation embankment frequency of settlement (Unimproved ground)

### 3.1.2 성토고(연약 처리지반)과 잔류침하량의 상관관계

Fig. 3과 같이 Preloading공법의 경우 전체 15개 중 5개가 허용잔류침하값을 초과하였으며, 초과비율은 33%를 차지하였다. 치환공법의 경우 전체 137 중 8개가 허용침하값을 초과하였으며, 초과비율은 6%를 차지하였다. 수집한 데이터 내 Preloading공법은 과반수 개수가 허용잔류침하량을 초과함에 따라 잔류침하에 가장 취약한 공법임을 알 수 있었다. 따라서 부득이하게 Preloading공법으로 설계 할 경우, 노반 재료 및 지지력에 대하여 좀 더 신중하게 고려 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

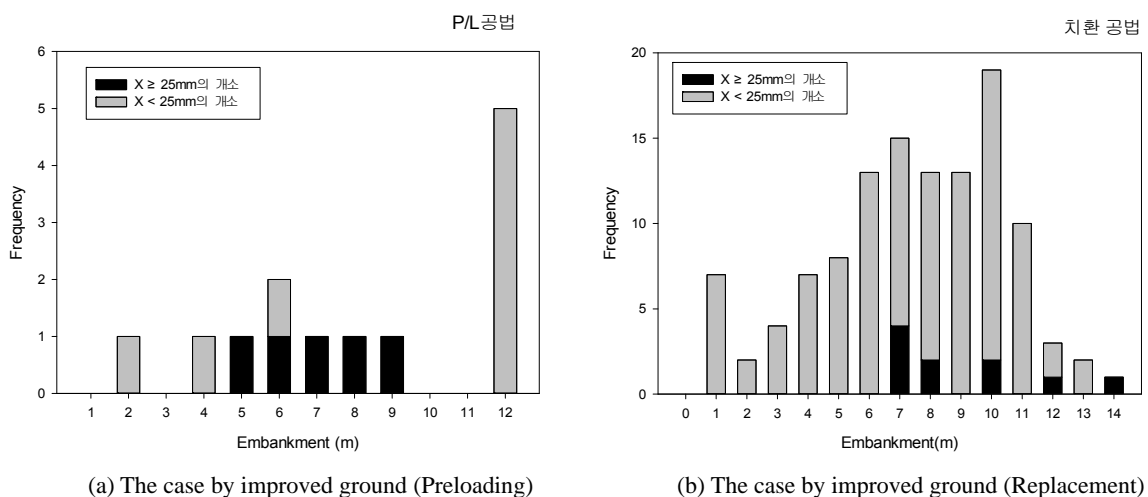
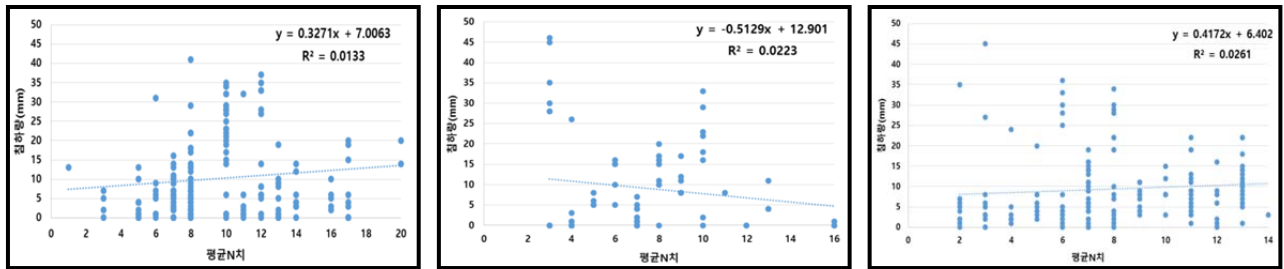


Fig. 3 The graph for correlation embankment with frequency of settlement (Improved ground)

### 3.2 N치에 따른 잔류침하 경향

N치는 지반강도를 간접적으로 평가하는 기법으로 N치가 클수록 지반의 강도가 큰 것을 의미한다. N치에 따른 잔류침하량을 분석한 결과 허용침하량을 초과하는 데이터는 사질토의 경우 175개 중 23개로 초과비율이 13%, 점성토의 경우 73개 중 9개로 초과비율이 12%, 처리지반의 경우 160개 중 13개로 초과비율이 8%를 차지했다. 그러나, 아래 Fig. 4와 같이 각 N치에 따라 다양한 침하량이 발생함에 따라 전체적으로 특정한 경향은 나타나지 않는 것으로 나타났다. 따라서, 지반강도는 잔류침하와는 상관관계가 없는 것으로 판단된다.

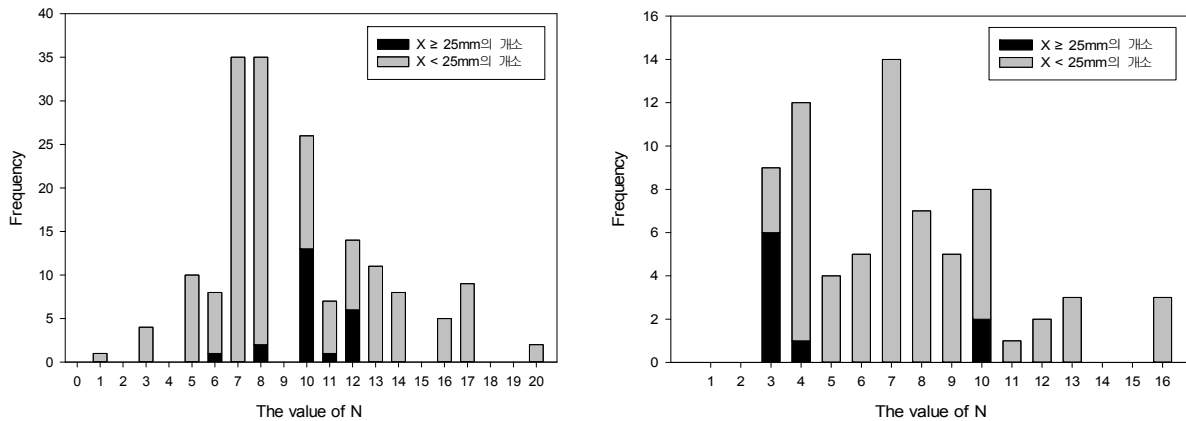


(a) The case by sandy soil (b) The case by cohesive soil (c) The case by improved ground

Fig. 4 The graph for correlation the value of N with settlement

#### 3.2.1 N치(연약 무처리지반)와 잔류침하량의 상관관계

Fig. 5와 같이 사질토의 경우 N치가 6~12에서 기준치를 초과하는 비율이 6~50%이며, 점성토의 경우 N치가 3~10에서 기준치를 초과하는 비율이 8~67%이다. 전반적으로 N치에 따른 잔류침하기준치 초과비율이 일정한 경향을 보이지 않음을 알 수 있었다.



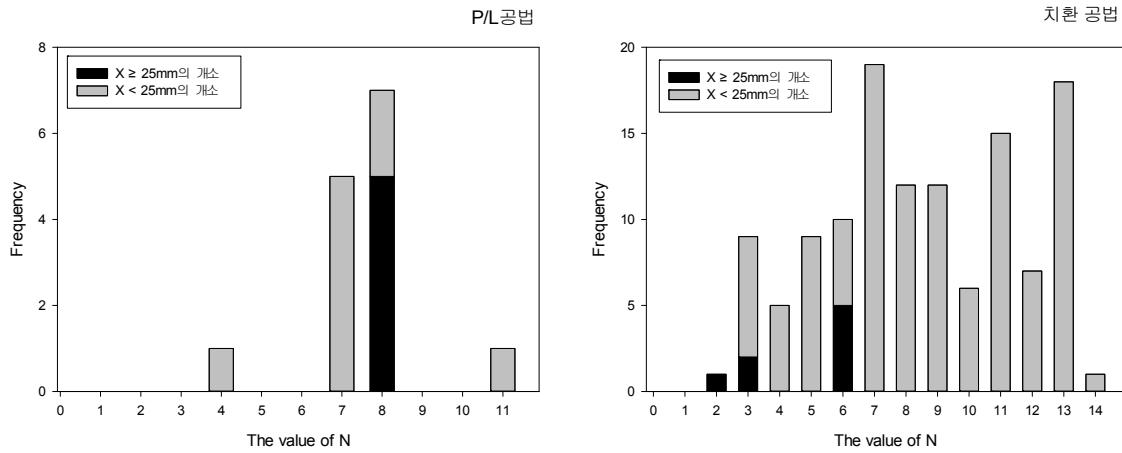
(a) The case by sandy soil

(b) The case by cohesive soil

Fig. 5 The graph for correlation the value of N frequency of settlement (Unimproved ground)

### 3.2.2 N치(연약 처리지반)와 잔류침하량의 상관관계

Fig. 6과 같이 Preloading공법의 경우 전체 15개 중 5개가 허용잔류침하값을 초과하였으며, 초과비율은 33%를 차지하였다. 치환공법의 경우 전체 137 중 8개가 허용침하값을 초과하였으며, 초과비율은 6% 차지하였다. 각 공법별 N치와의 일정한 경향을 가지고 있지는 않지만 확률적으로 Preloading공법 적용이 위험하다는 것을 판단할 수 있었다.



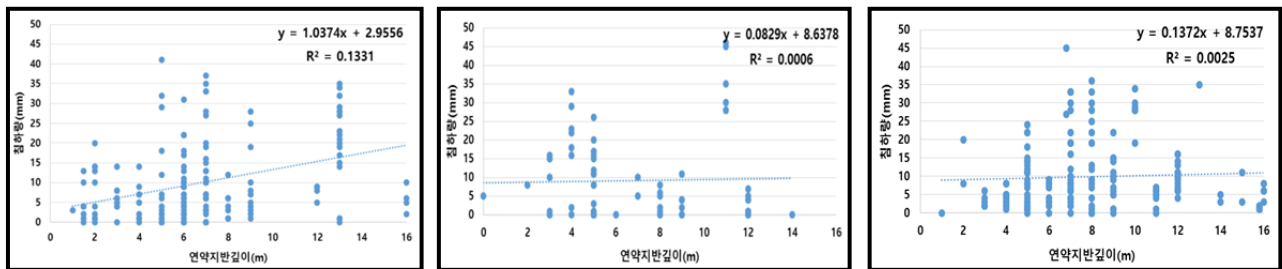
(a) The case by improved ground (Preloading)

(b) The case by improved ground (Replacement)

**Fig. 6** The graph for correlation the value of N with frequency of settlement (Improved ground)

### 3.3 연약지반 깊이에 따른 잔류침하 경향

N치의 연약지반 판정기준(Table. 1참고)에 따라 연약지반 깊이를 산정하였다. 관련 데이터를 분석한 결과 아래 Fig. 7과 같이 허용잔류침하량 초과비율이 사질토는 13%, 점성토는 12%, 처리지반은 8%로 나타났다. 따라서, N치에 따른 잔류침하 경향과 같게 연약지반 깊이 역시 특정한 경향은 보이지 않았음을 알 수 있었다.



(a) The case by sandy soil

(b) The case by cohesive soil

(c) The case by improved ground

**Fig. 7** The graph for correlation the depth of soft ground with settlement

### 3.3.1 연약지반 깊이(연약 무처리지반)와 잔류침하량의 상관관계

사질토의 경우 연약지반 깊이가 5~13m에서 허용잔류침하 기준치를 초과하는 비율이 3~48%이며, 점성토의 경우 연약지반 깊이가 4~11에서 허용잔류침하 기준치를 초과하는 비율이 4~100%이다. 전반적으로 연약지반 깊이에 따라 기준치 초과비율이 Fig. 8과 같이 일정한 경향을 보이지 않음을 알 수 있었다.

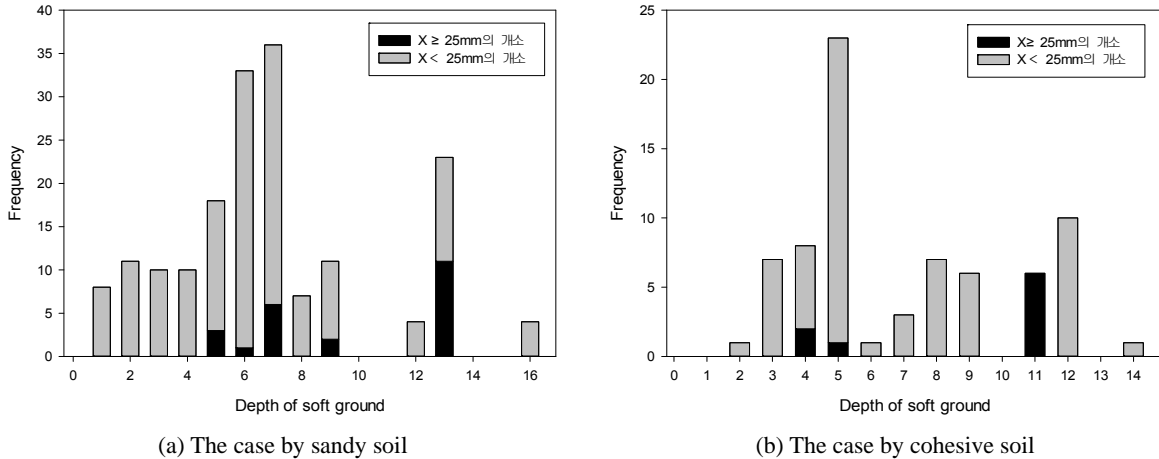


Fig. 8 The graph for correlation depth of soft ground frequency of settlement (Unimproved ground)

### 3.3.2 연약지반 깊이(연약 처리지반)와 잔류침하량의 상관관계

Fig. 9와 같이 Preloading공법의 경우 전체 15개 중 5개가 허용잔류침하값을 초과하였으며, 비율은 33%를 차지하였다. 치환공법의 경우 전체 137 중 8개가 허용침하값을 초과하였으며, 비율은 6% 차지하였다. 따라서, 연약지반과의 일정한 경향을 가지고 있지는 않지만 확률적으로 Preloading공법 적용이 위험하다는 것을 판단할 수 있었다.

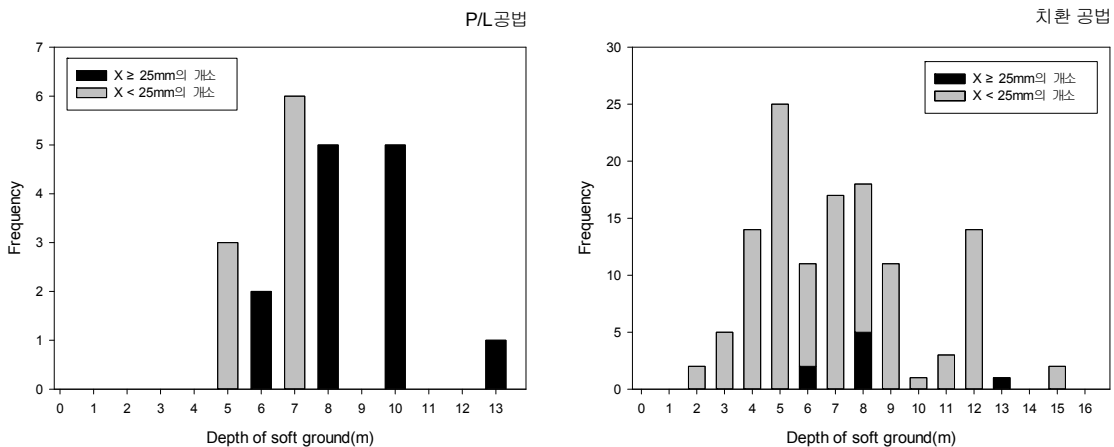


Fig. 9 The graph for correlation depth of soft ground with frequency of settlement (Improved ground)

## 4. 결 론

본 논문에서는 철도노반 토공구간 중 성토부를 대상으로 잔류침하와 그에 따른 영향요소의 상관관계를 규명하고자 하였으며 그 결과를 아래와 같이 기술하였다.

1. 그 동안 건설된 철도 노반에서 연약지반과 연관성 있는 데이터를 수집하였으며, 성토부 데이터 총 408개를 분석하였다. 지반재료에 따라 무처리지반 중 사질토는 175개, 점성토는 73개, 처리지반으로는 160개로 분류할 수 있었다. 또한 잔류침하 발생원인을 분석하기 위하여 성토고, N치, 연약지반 깊이를 영향인자로 분류하였다
2. 데이터 분석결과, 성토체 영향요소인 성토고가 높을수록 잔류침하량이 커지는 경향을 나타내었으며, 잔류침하량과의 상관관계가 다소 높음을 알 수 있었다. 그에 반해 원지반 영향요소인 N치와 연약지반 깊이는 잔류침하량과의 직접적인 상관관계를 띠지 않았다. 따라서, 노반의 잔류침하는 원지반의 영향요소 보다 성토체의 영향요소와의 상관관계가 깊다고 판단 된다.
3. 성토고 처리지반의 경우 10m 이상에 잔류침하가 발생하였으며, 무처리지반의 경우 Preloading의 잔류침하 초과비율이 33%, 치환처리의 잔류침하 초과비율이 6%로 발생하였다. 따라서 철도 노반 시공시 처리지반에서 성토고 높이를 10m 이상 쌓을 때와 무처리지반에서 Preloading공법을 적용할 때는 좀 더 세심한 주의가 필요하다고 판단된다.

## 참고문헌

- [1] D.S. Kim, S.C. Yang, J.S. Moon, H.J. Lee, et al. (2006) Settlement of embankment and foundation for concrete track of Gyungbu high speed railroad , Journal of the Korean Society for Railway, 9(6), pp. 644-651.
- [2] I.W. Lee, S.C. Yang, S.Y. Jang (2007) Study of Determination of Allowable Residual Settlement of Concrete Track Roadbed for High-Speed Railway , Fall conference of the Korean Society for Railway. pp. 1115-1119
- [3] S.J. Lee, I.W. Lee, S.H. Lee, K.J. Kim (2014) Evaluation for Settlement of Railroad Fill Materials , Spring conference of the Korean Society for Railway. pp. 127-131
- [4] Korea Railway Network Authority (2013) Rail Design Standard (Roadbed), Korea Railway Network Authority.