

# 건설 중인 경부고속철도 콘크리트궤도 기초침하 평가

## Evaluation of Foundation Settlement of Gyungbu High Speed Concrete Track Under Construction

김대상\* 유충현\*\* 김기환\*\*\*  
Daesang Kim, Chunghyun Yoo, Hwan Ki Kim

### ABSTRACT

Foundation settlements(settlements at the embankment surface and ground) has been evaluating to satisfy the strict allowable residual settlement level from the start of the construction of Gyungbu high speed railway. This is because both embankment and ground settlement could be important to minimize the residual settlement after the construction of concrete track.

Ground settlement is caused by the increase of effective stress resulting from embankment. The causes of embankment settlement could be come from different sources, for example, the increase of effective stress, rainfall, creep behaviors.

Based on the field measured data, this paper analysed the settlement of ground and embankment settlement. The biggest settlement at the embankment surface was 9.7mm during 246days at the STA 000k922.5. The calculated settlement of embankment itself was 8.6mm at the same places. These results conclude that the compressive settlement of embankment could not negligible.

### 1. 서론

경부고속철도 2단계 공사 구간에서는 엄격한 콘크리트궤도의 잔류침하 기준을 만족시키기 위하여 토공 건설시작 시점에서부터 성토체 및 원지반 침하를 평가하고 있다. 이는 고속철도 토공에서의 허용잔류침하 기준을 만족시키기 위해서는 원지반 침하뿐만 아니라 성토체 침하도 중요할 수 있기 때문이다.

도로 토공 및 과거의 토공에서는 성토체 침하를 시공 중 침하가 완료되는 즉시 침하로 간주하고 개통 후 잔류침하량 산정 시 성토체 침하를 고려하지 않고 원지반 침하만을 고려하였다. 그러나 경부고속철도 1단계 구간(서울~대구)의 침하 발생, 흙과 암의 혼합성토 재료를 사용하는 철도 토공 여건 등을 고려해 볼 때, 원지반 침하뿐만 아니라 성토체 침하도 개통 후 철도시스템 전체의 라이프사이클 비용을 고려하면 무시할 수 없는 수준일 수 있다.

성토체의 장기침하 특성은 하중조건, 사용 재료 및 다짐 품질, 강우 조건 등에 따라 달라질 수 있다. 따라서 성토체의 장기침하 특성을 평가하기 위하여 현장 침하 계측 결과를 토대로 원지반 및 성토체에서의 침하 발생량을 평가해 보는 것은 의미 있을 것이다.

원지반 침하는 성토에 따른 유효응력 증가로 인한 압밀침하가 주된 원인으로 예상되어, 압밀이론에 기초하여 원지반 침하를 평가하였다. 성토체침하는 성토에 따른 유효응력 증가로 인한 압축침하, 강우에 의한 침하, 유효응력 증가와 상관없이 성토 완료 후 지속적으로 발생하는 크립침하가 주요 원인일 수 있다.

본 연구 논문에서는 경부고속철도 2단계 공사 구간 중 고성토이면서 원지반이 상대적으로 취약하다고 평가된 개소에 대하여 성토 시공 중 및 완료 후 1년이 지난 시점에서의 원지반침하, 지표침하, 하부노반 침하 발생량을 침하 측정 결과를 토대로 정리 분석하였다.

\* 정희원, 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부 선임연구원

E-mail : [kds@krri.re.kr](mailto:kds@krri.re.kr)

TEL : (031)460-5305 FAX : (031)460-5319

\*\* 정희원, 건설교통부 철도건설팀 주무관

\*\*\* 비희원, 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부 연구원

## 2. 현장시험조건

경부고속철도 2단계 공사 구간 중 원지반 조건이 상대적으로 취약하고 성토고가 10m 이상인 000k930 지점에서 원지반 및 지표 침하를 2006년 5월 30일 이후부터 현재까지 측정하고 있다.

### 2.1 원지반 조건

그림 1은 침하측정 주변개소 원지반에 대한 시추주상도이다. 침하가 우려되는 실토질 점토층이 전 구간에 걸쳐 약 5.2m~6.2m 두께로 분포되어 있다. 서울방향(000k860)으로 갈수록 표준관입시험에 의한 N값이 작고, 부산 방향(000k935)으로 갈수록 N값이 큰 것을 확인할 수 있다. 원지반의 특성을 평가하기 위하여 현장 시료를 채취하여 물성 및 압밀시험을 수행하였다. 표 1과 2는 지표면 하 4.5m 지점에서 채취한 시료에 대한 시험결과이다.

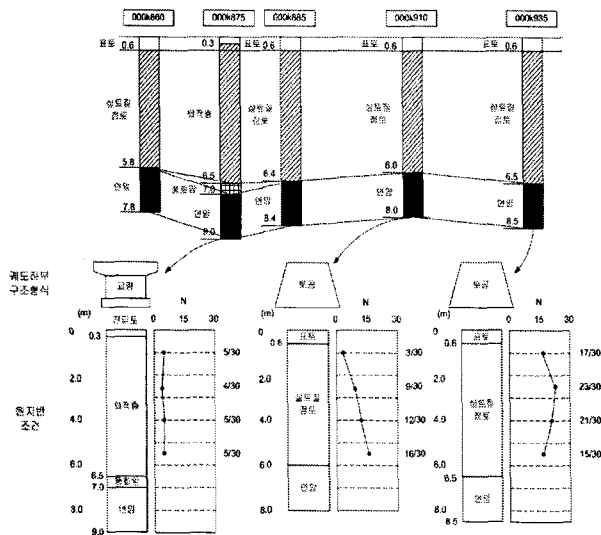


Fig. 1. 시추 주상도(000k860 ~ 000k935)

Table 1. 물성시험결과

비 중	2.717	액성한계	41.2%
단 위 중 량 ( $gf/cm^3$ )	1.9	소성한계	19.2%
초기간극비	0.908	소성지수	22.0%
자연함수비	33.4%	포화도	99.8%
흙분류		CL	

Table 2. 압밀시험결과

유효 상재하중 ( $P_0, kgf/cm^2$ )	0.405	선행 압밀하중 ( $P_c, kgf/cm^2$ )	0.78
압축지수 ( $C_c$ )	0.216	팽창지수( $C_r$ )	0.029
압밀계수 ( $C_v, cm^2/sec$ )	NC	$5.25 \times 10^{-4}$	
	OC	$1.19 \times 10^{-3}$	

추조사 결과 표토를 제거한 지표에서 5.5m 까지는 N값이 15 이하인 하상 퇴적층이었다. 퇴적층 상층은 실트 및 점토질 로, 하층은 모래 및 잔자갈이 혼재된 실트 및 점토질 층으로 구성되어 있었다. 지하수위는 지표면에 위치하는 것으로 파악되었다. 물성시험 결과 흙은 저압축성 점토(CL)로 분류되었고, 자연 함수비는 33.4%로 약간 낮은 편이었다. 압밀 시험 결과 선행압밀하중( $P_c$ )이  $0.78 kgf/cm^2$ 인 과압밀점토 지반으로 평가되었다. 따라서 원지반은 성토하중에 의해 정규압 밀을 경험하는 개소로 판단되었다. 압축지수 ( $C_c$ )는 0.216으로 크지 않았고, 압밀계수( $C_v$ )는 과압밀영역에서  $1.19 \times 10^{-3} cm^2/sec$ , 정규압밀영역에서  $5.25 \times 10^{-4} cm^2/sec$ 로 평가되었다.

### 2.2 성토 조건

성토 현황을 파악하기 위하여 현장에서 입도분석, 들밀도 시험을 수행하였고, 함수비를 측정하였다. 표 3과 그림 3은 하부노반에서 채취된 시료의 입도분석 결과이다. 5mm체 통과율은 24.7%로 토사 함유량이 타 공구와 비교할 때 상대적으로 많은 개소였다. 100mm체 통과율은 94.6%로 고속철도 상부노반 입도 분포기준을 만족하는 재료를 사용하고 있으며, 100mm 보다 큰 입경 재료의 함량은 타 공구와 비교할 때 그 다지 높지 않았다. 1mm이하 입경 재료의 경우 입도분포를 부분적으로 만족하고 있지 못함을 알 수 있었다. 물 치환법을 이용한 현장밀도시험 결과 습윤 단위중량  $2.26 t/m^3$ , 건조단위중량  $2.137 t/m^3$ 이었고, 전체

함수비는 5.87%이었다.<표 4>

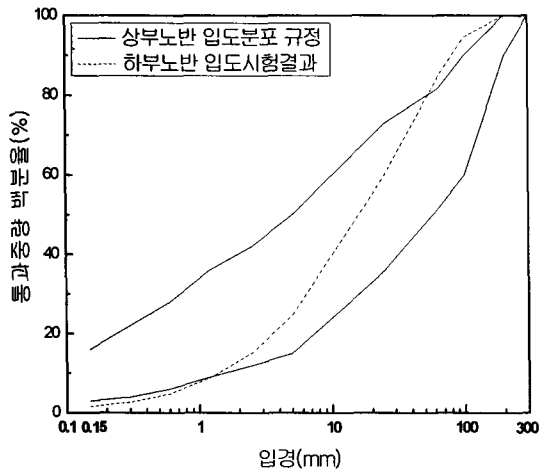


Fig. 2. 하부노반 입도분포

Table 3. 입도분포 특성

위치	5mm체 통과율	100mm체 통과율	최대 입경	비고
000k930	24.7%	94.6%	200mm	하부노반

Table 4. 단위중량 및 함수비

위치	습윤 단위중량 (tf/m <sup>3</sup> )	건조 단위중량 (tf/m <sup>3</sup> )	함수비 (%)	비고
000k930	2.262	2.137	5.87	하부노반

### 2.3 계측기 설치 현황

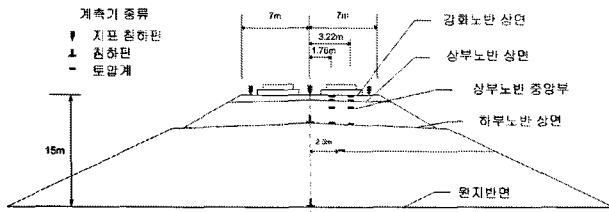


Fig. 3. 침하판 및 토압계 설치 위치

하부노반층의 압축침하량을 평가하기 위하여 하부노반 상면에 원지반 침하판과 동일한 형태의 침하판을 원지반 침하판과의 중복으로 인한 이격거리를 확보하고 설치하였다. 지표침하판의 경우 000k930지점을 중심으로 열차진행 방향으로 3개를 설치하고, 좌우측에 5.0m간격으로 2개를 설치하였다.

토압계는 성토 시 및 열차 운행 중 발생하는 응력 수준을 평가하기 위하여 총 9개의 토압계를 설치할 계획이며, 현재 7개의 토압계 설치가 완료된 상태이다.

### 3. 침하계측 결과분석

#### 3.1 원지반 침하

시험 단면에 대한 토공 작업은 2006년 5월 30일 시작하여 동년 7월 14일까지 57일 동안 하부노반 성토(성토고, 12.12m)를 완료하였으며, 상부노반 성토(성토고, 14.59m)는 동년 8월 7일까지 13일 만에 완료하였다. 이후 동년 8월 17일에 강화노반층(45cm)을 시공 완료 한 후 선로 측구 등 추가 공정 등이 완료된 10월 24일에 최종 시공기면(최종 성토고, 15.25m)을 완성하였다. 흙쌓기 평균속도는 상부노반은 0.19m/day, 하부노반은 0.21m/day의 속도로 시공되어 상당히 빠른 속도로 진행된 것을 알 수 있다. 그림 8은 성토에 따른 원지반 침하 측정 결과로, 2006년 5월 30일 침하 계측을 시작하여 2007년 6월 12일까지 377일간 원지반에서 계측된 총 침하 발생량은 9.97cm 이었다. 원지반 침하 계측 결과로부터 원지반의 압밀침하는 성토중에 거의 완료된 것으로 판단되었다.

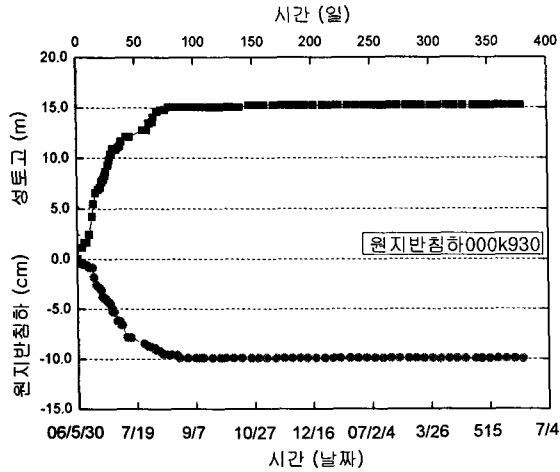


Fig. 4. 원지반 침하량(000k930)

Table 5. 최종침하량 및 압밀도

평가법	최종침하량(cm)	압밀도(%)
쌍곡선법	10.04	99.3
평방근법	10.05	99.2
Asaoka법 (30일간격)	10.07	99.0

### 3.2 지표 침하

지표에서 발생한 총 침하량을 평가하기 위하여 시험 개소 단면 5개 지점에 대한 침하 측정 결과를 <그림 5>~<그림 8>과 같이 평가하였다.

지표침하에서 원지반 침하를 뺀 상하부노반만의 침하량을 평가하는 것도 의미가 있으나, 본 연구에서는 잔류침하량 결정에 필요한 총 지표침하량에 대한 침하 경향을 분석하였다. 총 침하가 가장 큰 개소는 000k922.5 지점으로 246일간 9.7mm의 침하가 발생하였다<그림 5>. 동 개소의 성토체만의 침하량을 계산한 결과는 8.6mm로 측정기간 동안 원지반 침하량에 추가하여 성토체 침하량도 무시할 수 없을 정도로 발생하고 있음을 확인할 수 있었다. 000k927.5 지점에 대한 지표 침하 측정 결과 총 발생 지표 침하량은 6.4mm로, 000k922.5 지점보다 작은 지표 침하가 발생하였다<그림 6>. 특이한 점은 2007년 2월 20일 이후 침하 속도가 가파르게 증가하고 있는 점이다.

토공 횡단면 상에서의 부등침하를 평가하기 위하여 설치한 000k927.5 지점 상하선 상에서의 지표 침하 측정 결과는 현장 여건 상 침하계 설치 시점이 상이하여 정확한 분석은 쉽지 않으나, 침하 경향에 큰 차이가 없는 것으로 판단되었다<그림 7>. 000k952.5지점의 경우 000k922.5지점과 불과 30m 이격되어 있으나, 지표침하 발생 양상은 전혀 다른 경향을 보여 주고 있는데 이는 000k952.5지점으로 가까워질수록 원지반고가 높아지고 상대적으로 성토고가 낮아지기 때문으로 판단되었다<그림 8>.

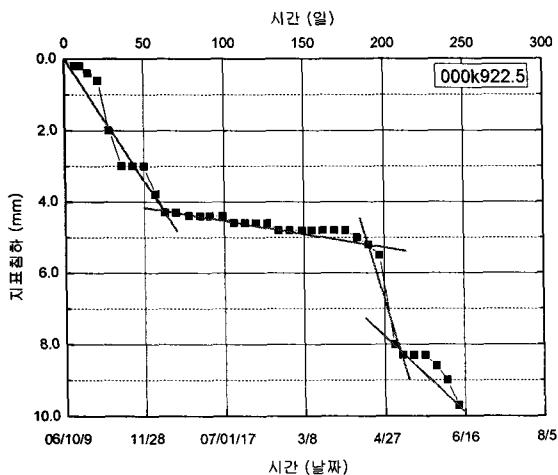


Fig. 5. 침하이력(000k922.5)

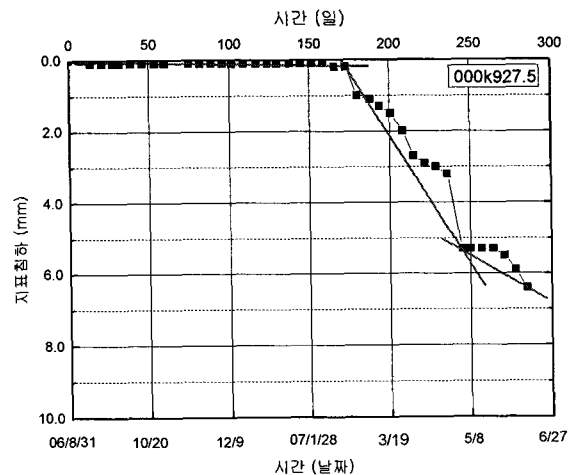


Fig. 6. 침하이력(000k927.5)

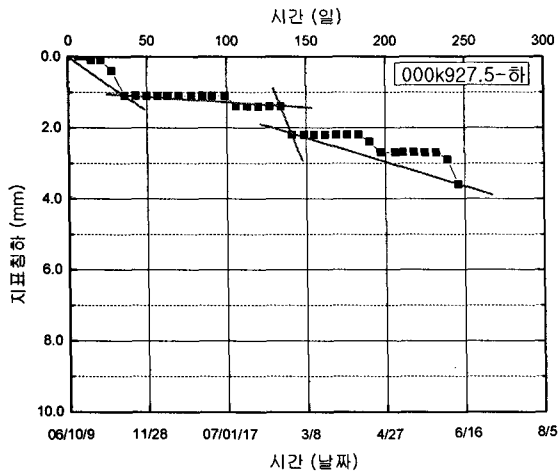


Fig. 7. 침하이력(000k927.5-하)

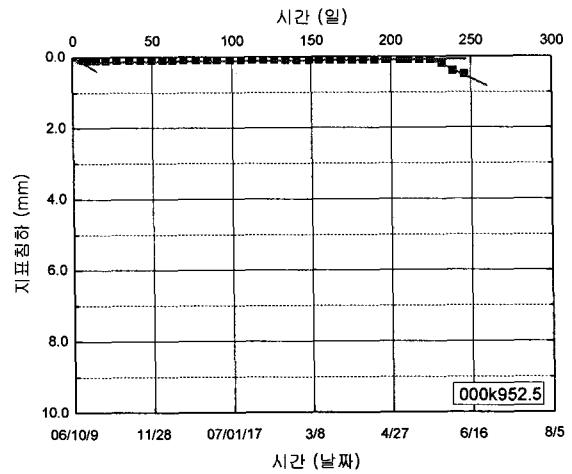


Fig. 8. 침하이력(000k952.5)

Table 6. 지표침하량과 침하속도

위치	계측 시작일 (년월일)	계측기간(day)	지표 침하량 (mm)	평균 침하속도 (cm/month)
000k922.5	061009	246	9.7	0.118
000k927.5	060831	285	6.4	0.067
000k927.5-하	061009	246	3.6	0.044
000K952.5	061009	246	0.5	0.006

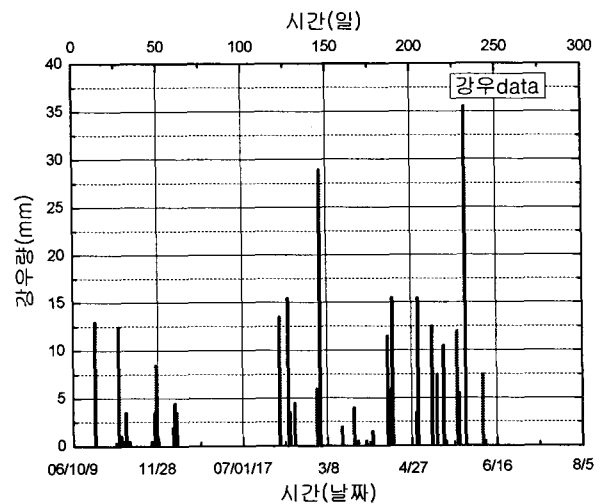


Fig. 9. 강우분포

<표 6>은 5개 지점에 대한 계측기간 동안의 총 지표침하량과 평균 침하속도를 정리한 결과이다. 침하속도가 빠른 개소의 경우 1개월에 평균 1mm 이상의 침하가 발생하였음을 확인할 수 있었다.

침하가 급증하는 원인을 파악하기 위하여 침하 급증시점과 강우시기를 비교해 본 결과, 강우 후 침하 발생이 급증하고 있는 것을 확인할 수 있었다<그림 9>. 침하급증시점에서의 침하속도 및 침하속도 변화로부터 침하 속도가 가장 큰 개소의 경우 1개월에 평균 2mm 이상 최대 5mm까지 침하가 발생하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 강우 후 침하가 증가하는 경향에 대한 평가는 여름철 장마 후의 침하 계측 결과로 평가 할 계획이다.

### 3.3 하부노반 침하

하부노반의 압축침하량을 평가하기 위하여 하부노반 성토 완료 후 하부노반 상면에 침하판을 설치하였다. 설치 높이는 원지반면에서 12.12m 지점이었고, 설치 위치는 침하판의 크기와 도공 작업 시 작업 장비의 원활한 통행을 고려하여 000k925지점으로 결정하였다.

하부노반 침하량은 상하부노반 경계에 설치한 침하판에서측정한 침하량에서 원지반 침하량을 뺀 순수 하부노반의 압축침하량이다. 그림 9는 2006년 7월 25일부터 2007년 6월 12일까지 322일간 계측된 하부노반 침하량을 날짜별로 정리한 결과이다.

322일간 하부노반에서 발생한 압축 침하량은 1.63 cm이었다. 2006년 8월 24일까지의 상대적으로 큰 침하(9.3mm)는 상부노반의 상재하중 증가로 인한 하부노반 내 유효응력 증가가 그 원인인 것으로 판단된다.

상부노반 성토 완료 이후 침하량이 수렴하는 경향을 보이다가 2007년 2월 13일 이후부터 침하가 다시 증가하여 성토 완료 이후에도 하부노반에서의 침하가 계속 발생하고 있음을 확인할 수 있었다<표 7>. 현 상황에서는 하부노반의 침하가 지속적으로 발생할지, 수렴하는 경향을 보일지 명확하지 않다. 향후 침하 측정 결과 분석을 통하여 이에 대한 정확한 예측이 필요 할 것이다.

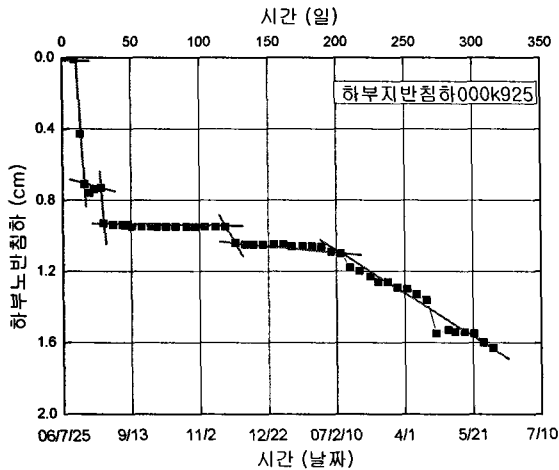


Fig. 9. 하부노반 침하량(000k925)

Table 7. 기간별 하부노반 침하속도분석

시작일 (년월일)	종료일 (년월일)	시작점 (cm)	종료점 (cm)	침하량 (cm)	침하속도 (cm/month)
060725	060803	0.00	0.01	0.01	0.03
060803	060810	0.01	0.71	0.70	3.00
060810	060822	0.71	0.73	0.02	0.05
060822	060824	0.73	0.93	0.20	3.00
060824	061121	0.93	0.95	0.02	0.01
061121	061128	0.95	1.04	0.09	0.39
061128	070213	1.04	1.10	0.06	0.02
070213	070612	1.10	1.63	0.53	0.13

#### 4. 결론

현재 2008년도 상반기 토공사 완료를 목표로 경부고속철 도 토공 작업이 진행 중이다. 본 논문에서는 공사 중인 현장에서 원지반이 상대적으로 취약하고 고성토로 평가되는 개소에 대하여 성토 시공 중 및 시공 완료 후 1년이 지난 시점에서 원지반 침하, 지표침하, 하부노반 침하 발생량을 현장 침하 측정 결과를 토대로 정리 분석하였다.

(1) 377일 동안 계측된 총 원지반 침하 발생량은 9.97cm 으로 예측된 최종침하량은 10cm 정도로 평가되었다. 동 개소의 성토 상재하중에 의한 원지반의 현재 압밀도는 99%이상이므로, 현 단계에서 원지반의 압밀 진행이 거의 완료된 것으로 평가되었다.

(2) 5개 지점의 지표침하량 측정 결과를 분석해 본 결과, 최대 지표침하 발생량은 9.7mm이었다. 침하가 많이 발생한 개소의 경우 1개월에 평균 1mm이상의 침하가 발생하였음을 확인할 수 있었다. 또한 불과 30m 떨어진 침하 측정 개소에서 지표 침하 발생량이 크게 다른 것을 확인할 수 있었다.

(3) 강우가 침하 발생 증가에 미치는 영향을 확인하기 위하여 침하 급증시점과 강우 시점이 일치하는 것을 확인한 결과 두 시점이 거의 일치하는 것을 확인 할 수 있었다. 강우 후 침하 속도는 1개월에 평균 2mm이상 최대 5mm까지 속도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

(4) 계측기간 동안 하부노반에서 발생한 총 압축침하량은 1.63cm로, 상부노반 성토완료 이 후에도 침하가 지속적으로 발생하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 하부노반 성토고 12.12m에 대한 현 단계에서의 총 압축 변형률은 0.135% (0.077% 상부노반 성토에 의한 변형률, 0.058% 토공완료 후 변형률)로, 이는 향후 혼합 성토재료 사용에 대한 성토고 제한 규정 결정에 활용될 수 있을 것이다.

#### 5. 참고 문헌

1. 철도설계기준(노반편), 한국철도시설공단 (2004)
2. 고속철도설계기준(노반편), 한국철도시설공단 (2005)
3. 고속철도공사 전문시방서(노반편), 한국고속철도건설공단 (2003)