

경부고속철도 콘크리트궤도 토공 및 원지반 침하 (II)

Settlement of Embankment and Foundation for Concrete Track of Gyungbu High Speed Railroad (II)

김대상[†] · 박성용* · 김현기[†] · 신민호** · 이현정***

Daesang Kim · Seong Yong Park · Hyun Ki Kim · Min ho Shin · Hyeon Jung Lee

Abstract An application of concrete track is being actively processed for the construction of Korean railroad. The concrete track has an advantage to decrease the maintenance fee, but is very difficult to control the settlement of ground and embankment consisting of substructure of concrete track below the allowable settlement level. This is the reason why the measurement and evaluation of both ground and embankment settlement before the installation of the concrete track is very important. One ground, a lower subgrade, and five surface settlements are measured to understand the settlement behavior of ground and embankment settlement. The period to measure settlements was more than 1 year after the completion of embankment. In this test site, ground settlement was over during the construction of embankment, but the embankment settlement are being continuously proceeded after the completion of embankment. The settlement velocity gradually is slowing down as time goes by. This paper also analysed the reasons of abrupt settlement increase and concluded that the rainfall was one of the important reason to increase settlement rate.

Keywords : Concrete Track, Settlement, Embankment and Foundation, High Speed Railroad

요 지 콘크리트궤도는 최근 국내에 활발히 적용되고 있다. 콘크리트궤도는 유지보수 비용 저감을 꾀할 수 있다는 장점이 있으나, 콘크리트궤도 구축 후 토공에서 발생할 수 있는 침하를 허용범위 이내로 관리하는 것은 쉽지 않다. 따라서 궤도 공사 이전에 토공 침하를 측정하고 평가하는 것은 매우 중요하다. 원지반과 성토체에서의 침하 거동을 평가하기 위하여 1개의 원지반 침하관, 1개의 하부노반 침하관, 5개의 지표침하관을 설치하여 성토 완료 후 1년 이상 동안 계측을 수행하였다. 시험개소의 경우 원지반 침하는 시공 중에 완료된 것으로 평가되었다. 그러나 성토체 침하는 성토 완료 후에도 지속적으로 발생하고 있으며, 침하 속도는 점진적으로 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 본 논문에서는 침하 급증 원인을 분석하여 강우가 침하 급증의 주요원인 중의 하나인 것을 확인하였다.

주 요 어 : 콘크리트궤도, 침하, 토공 및 원지반, 고속철도

1. 서 론

경부고속철도 2단계 공사 구간에서는 엄격한 콘크리트궤도의 잔류침하 기준을 만족시키기 위하여 토공 건설시작 시점에서부터 성토체 및 원지반 침하를 평가하고 있다. 이는 콘크리트궤도 구축 후 허용잔류침하 기준을 만족시키기 위

해서는 원지반 침하뿐 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 침하뿐 아니라 성토체 침하도 개통 후 철도시스템 전체의 라이프사이클 비용을 고려하면 무시할 수 없는 수준일 수 있다.

† 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부 선임연구원
E-mail : kds@krii.re.kr

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

* 비회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정

** 정희원, 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부 수석연구원

*** 비회원, 한국철도시설공단, 건설본부 중부권 PM팀장

성토체의 장기침하 특성은 하중조건, 사용재료 특성, 다짐 품질, 기후조건 등에 따라 달라질 수 있다. 따라서 철도 토공의 장기침하 특성을 평가하기 위하여 현장침하 계측결과를 토대로 성토체 및 원지반에서의 침하 발생량을 평가해보는 것은 큰 의미가 있을 것이다. 성토체 침하는 유효응력 증가로

인한 압밀침하가 주된 원인으로 예상되는 원지반 침하와 다르게, 유효응력 증가로 인한 압축침하 이외에도 강우 및 사용재료 특성에서 기인되는 크립침하가 주요 원인일 수 있다.

본 연구에서는 경부고속철도 2단계 공사 구간 중 고성토이면서 원지반이 상대적으로 취약하다고 평가된 개소에 대하여 토공사 시작 후 1년이 지난 현 시점까지의 계측결과를 토대로 원지반 및 성토체에서의 침하 계측 발생량을 평가해 보았다.

2. 현장시험조건

경부고속철도 2단계 공사 구간 중 원지반 조건이 상대적으로 취약하고 성토고가 10m 이상인 000k930지점에서 원지반 및 지표 침하를 2006년 5월 30일 이후부터 현재까지 측정하고 있다.

2.1 원지반조건

그림 1은 침하측정 주변개소 원지반에 대한 시추주상도이다. 원지반은 침하가 우려되는 실토질 점토층이 전 구간에 걸쳐 약 5.2m~6.2m 두께로 분포되어 있다. 서울방향(000k860)에서는 지반조건이 연약하고, 부산방향(000k960)에서는 원지반 조건이 양호한 것으로 평가되었다. 시추조사 결과 표토를 제거한 지표에서 5.5m까지는 N값이 15 이하인 하상 퇴적층이었다. 퇴적층 상층은 실트 및 점토질로, 하층은 모래 및 잔자갈이 혼재된 실트 및 점토질 층으로 구성되어 있었다. 지하수위는 지표면에 위치하는 것으로 파악되었다.

원지반의 특성을 평가하기 위하여 현장 시료를 채취하여 물성 및 압밀시험을 수행하였다.

표 1과 2는 지표면 하 4.5m지점에서 채취한 시료에 대한 시험결과이다. 그림 2는 동 시험개소의 원지반 및 토공 개념도이다. 물성시험 결과 흙은 저압축성 점토(CL)로 분류되었고, 자연 함수비는 33.4%로 약간 낮게 평가되었다. 압밀 시험 결과 선형압밀하중(P_c)이 0.78kgf/cm²인 과압밀점토 지반으로 평가되어 성토하중에 의하여 정규압밀을 경험하는 개소로 판단되었다. 압축지수 (C_c)는 0.216으로 크지 않았으며, 압밀계수(C_v)는 5.25×10^{-4} cm²/sec로 평가되었다. 성토체의 단위중량은 현장들밀도시험 결과로부터 산정하였다.

2.2 성토 조건

성토체의 기본 물성을 평가하기 위하여 현장 들밀도 시험을 수행 한 후 채취된 시료를 이용하여 입도분석 및 함수비를 측정하였다. 표 3과 그림 3은 하부노반에서 채취된 시료의 입도분석 결과이다. 5mm체 통과율은 24.7%로 토사 함유량이 타 공구와 비교할 때 상대적으로 높았다. 100mm체 통과율은 94.6%로 고속철도 상부노반 입도분포기준을 만족하는 재료

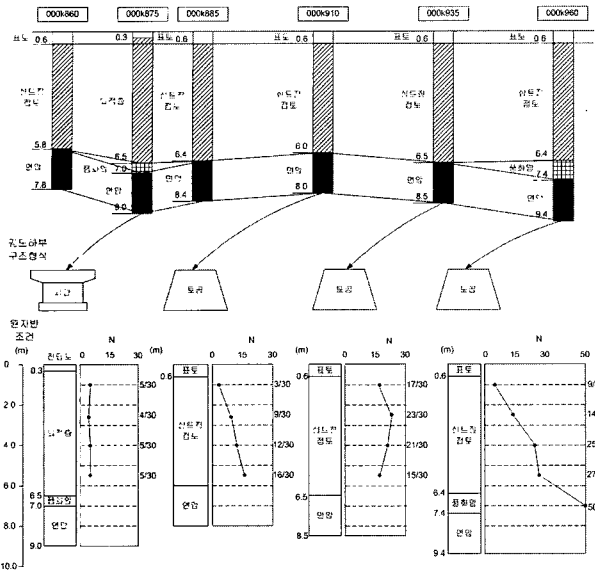


Fig. 1. Drilling logs(000k860 ~ 000k960)

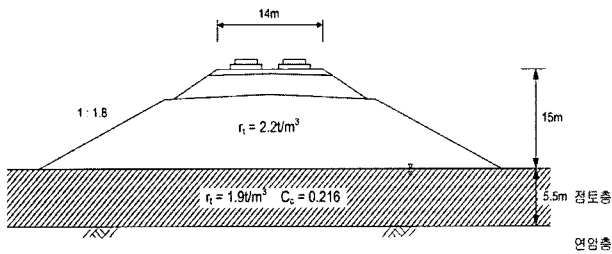


Fig. 2. Concept drawing of embankment

Table 1. Test results of physical properties of ground soil

비 중	2.717	액성한계	41.2%
단위중량 (gf/cm ³)	1.9	소성한계	19.2%
초기간극비	0.908	소성지수	22.0%
자연함수비	33.4%	포화도	99.8%
흙 분류		CL	

Table 2. Consolidation test results of ground soil

유효상재 하중 (P_0 , kgf/cm ²)	0.405	선형압밀 하중 (P_c , kgf/cm ²)	0.78
압축지수(C_c)	0.216	팽창지수(C_r)	0.029
압밀계수 (C_v , cm ² /sec)	5.25×10^{-4}		

Table 3. Characteristics of mixed soil particle size distribution of lower subgrade

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

Table 4. Unit weights and water content of lower subgrade

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

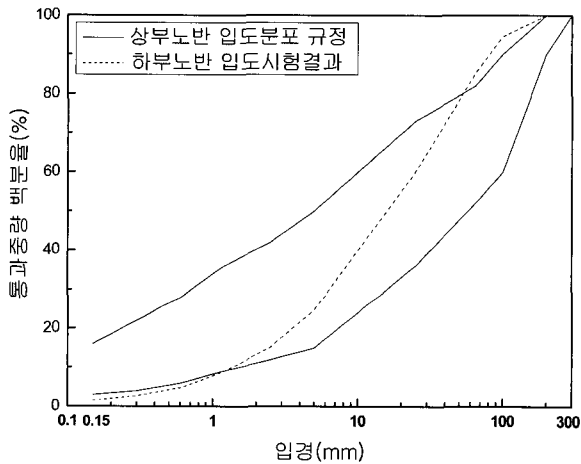


Fig. 3. Mixed soil particle size distribution of lower subgrade

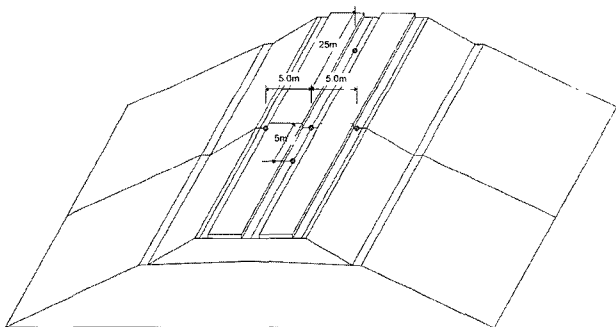


Fig. 4. Installation locations of surface settlement gauges

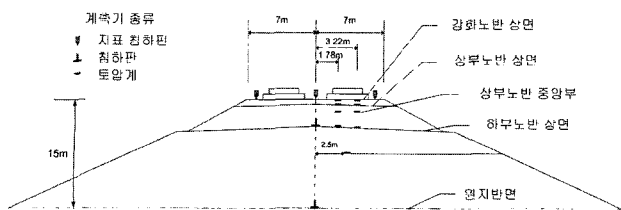


Fig. 5. Installation locations of ground settlement gauges

를 사용하고 있으며, 100mm보다 큰 입경재료의 함량은 타 공구와 비교할 때 높지 않았다. 1mm이하 입경 재료의 경우에는 입도분포규정을 부분적으로 만족하고 있지 못하였다.

물 치환법을 이용한 현장밀도시험 결과 습윤 단위중량 2.262 t/m³, 건조단위중량 2.137t/m³이었고, 전체 함수비는 5.87%이었다(표 4).

2.3 계측기 설치 현황

원지반, 상부노반 및 하부노반의 층 별 침하를 평가하기 위하여 침하판을 설치하였다. 그림 4와 5는 지표침하판(5개), 원지반 침하판(1개), 하부노반 침하판(1개), 토압계(9개)의 설치 현황이다.

원지반 침하판은 성토로 인하여 원지반 침하가 가장 클 것으로 예상되는 토공 중심축 상에 그림 5와 같이 설치하였다. 하부노반층의 압축침하량을 평가하기 위하여 하부노반 상면에 원지반 침하판과 동일한 형태의 침하판을 원지반 침하판과의 중복으로 인한 이격거리를 확보하고 설치하였다. 지표 침하판의 경우 000k930지점을 중심으로 열차진행 방향으로 3개를 설치하고, 좌우 부등침하를 확인하기 위하여 5.0m간격으로 2개를 설치하였다.

토압계는 성토 시 및 열차 운행 중 발생하는 응력 수준을 평가하기 위하여 총 9개의 토압계를 설치하였다. 그림 6과 그림 7은 현장에 설치된 지표침하판과 원지반 침하판의 모습이다.

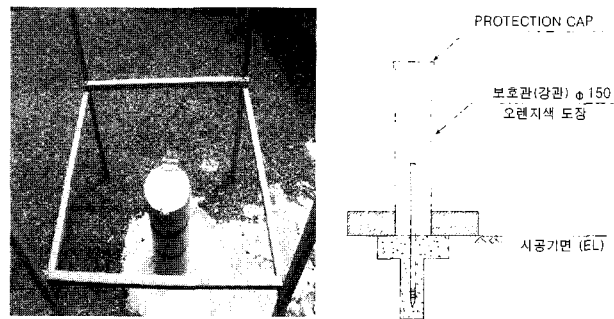


Fig. 6. Surface settlement gauge

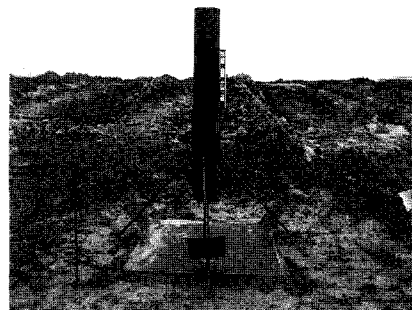


Fig. 7. Ground settlement gauge

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 13일에 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 시공 평균속도는 상부노반은 19cm/day, 하부노반은 21cm/day로 상당히 빠른 속도로 진행된 것을 알 수 있다. 그림 8은 성토에 따른 원지반침하 측정 결과로, 2006년 5월 30일 계측을 시작하여 2007년 9월 18일까지 476일 동안 원지반에서 계측된 총 침하량은 10.05cm이었다. 현재까지의 계측 결과를 보면, 원지반 압밀침하는 시공 중에 완료된 것으로 판단된다.

3.2 지표 침하

그림 9~그림 13은 5개 지점에 대한 지표 침하 측정 결과이다. 계측기 설치의 시공 및 현장 여건에 따라 설치 시점이 상이하였다. 지표침하에서 원지반 침하를 뺀 상하부노반 자체만의 침하량을 평가하는 것도 의미가 있으나, 본 연구에서는 허용잔류침하기준 만족 여부 결정에 필요한 총 지표침하량에 대한 침하 경향을 분석하였다.

총 침하가 가장 크게 발생한 개소는 000k922.5 지점으로 344일간 11.8mm의 침하가 발생하였다(그림 9). 평균침하 속도는 약 1mm/개월이었다. 동 개소의 성토체만의 침하량을 계산한 결과는 10.4mm로 계측기간 동안 원지반 침하량에 추가하여 성토체 침하량도 무시할 수 없을 정도로 발생하고 있음

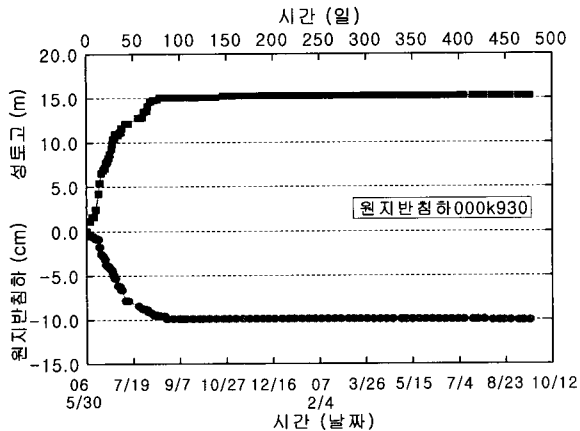


Fig. 8. Ground Settlement(000k930)

을 확인할 수 있었다. 000k927.5 지점에 대한 지표 침하 측정 결과 총 발생 지표 침하량은 8.3mm로, 000k922.5 지점보다는 작은 지표 침하가 발생하였다(그림 10). 특이한 점은 2007년 2월 20일 이후 침하 속도가 가파르게 증가하고 있는 점이다.

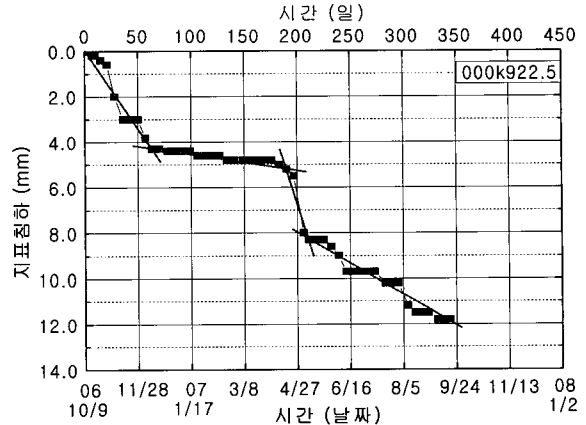


Fig. 9. Total(embankment and ground) settlement (000k922.5)

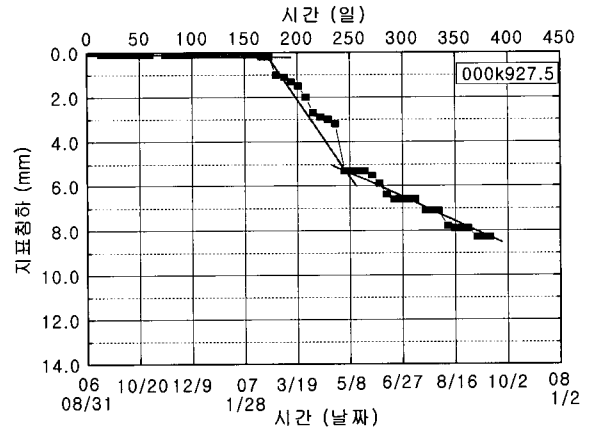


Fig. 10. Total(embankment and ground) settlement (000k927.5)

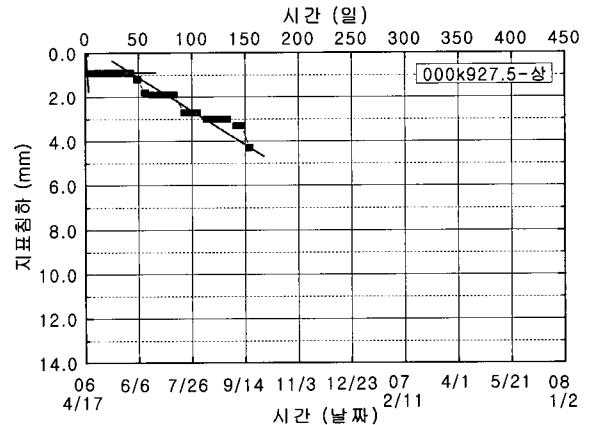


Fig. 11. Total(embankment and ground) settlement (000k927.5-L)

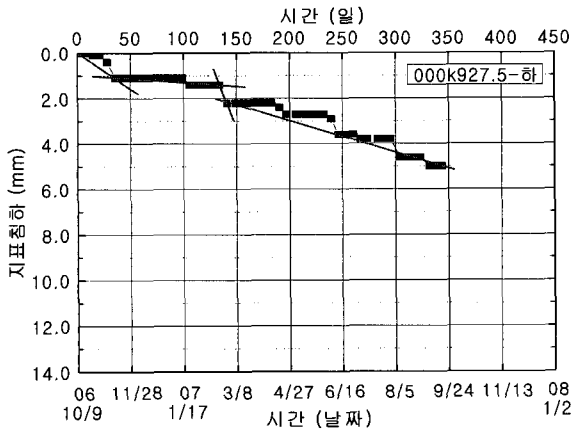


Fig. 12. Total(embankment and ground) settlement (000k927.5-R)

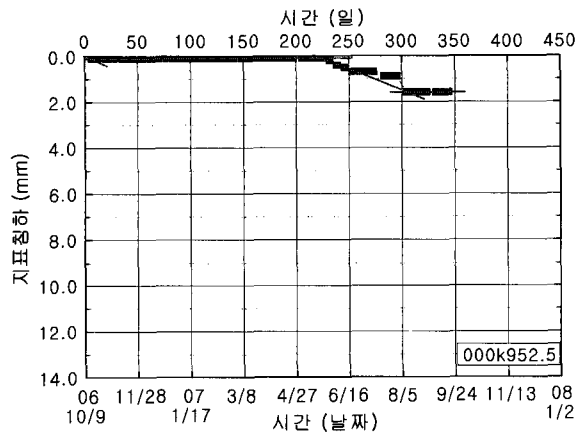


Fig. 13. Total(embankment and ground) settlement (000k952.5)

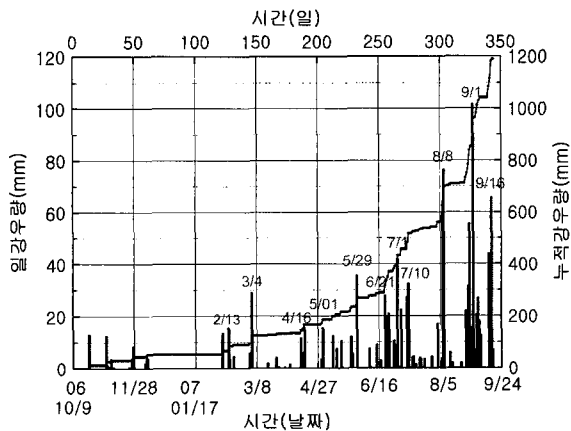


Fig. 14. Rainfall data

횡단면 상에서의 부등침하를 평가하기 위하여 설치한 000k927.5 지점 상하선 지점에서의 지표침하 측정 결과는 현장 여건 상 침하계 설치 시점이 상이하여 정확한 분석은 쉽지 않았으나, 침하 경향에 큰 차이가 없는 것으로 판단되었다(그림 11, 12).

Table 5. Settlement Velocity

위치	계측 시작일 (년월일)	계측기간 (day)	성토체침하량 (mm)	지표 침하량 (mm)	평균 침하속도 (cm/month)
000k922.5	061009	344	10.4	11.8	0.102
000k927.5	060831	383	6.9	8.3	0.065
000k927.5-L	070417	154	2.9	4.3	0.084
000k927.5-R	061009	344	3.6	5.0	0.044
000K952.5	061009	344	0.2	1.6	0.014

000k952.5지점의 경우 000k922.5지점과 불과 30m 이격되어 있으나, 지표침하 발생 양상은 다른 경향을 보여 주고 있다. 이는 000k952.5지점에 가까울수록 원지반 조건이 좋고 공정 상 조기에 토공이 완료되었기 때문으로 판단되었다(그림 13).

표 5는 5개 지점에 대한 계측기간, 총 지표침하량, 평균 침하속도를 정리한 결과이다. 침하속도가 빠른 개소의 경우 1개월에 평균 1mm 이상의 침하가 발생하였음을 확인할 수 있었다.

침하가 급증하는 원인을 파악하기 위하여 강우가 침하 급증에 미치는 영향을 평가하기 위하여 계측기간 동안 일 강우량과 누적강우량을 정리하였다(그림 14). 침하 급증 시점과 강우시점을 비교해 본 결과, 07년 4월 17일, 5월 29일은 침하량 급증시점과 강우시점이 일치하였다.

000k922.5지점의 07년 2월 20일 이후의 급격한 침하는 교대 뒷채움재와 돌붙임 재료 쌓기에 의한 상재하중 증가가 그 원인으로 판단되었다.

강우 후 침하급증시점에서의 침하속도 및 침하속도 변화로부터 침하 속도가 가장 큰 개소의 경우 1개월에 평균 2mm 이상 최대 5mm까지 침하가 발생하고 있음을 알 수 있었다.

3.3 하부노반 침하

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

하부노반 침하량은 상하부노반 경계에 설치한 침하판에서 측정된 침하량에서 원지반 침하량을 뺀, 하부노반만의 압축 침하량을 의미한다. 그림 15는 2006년 7월 25일부터 2007년 9월 18일까지 425일간 계측된 하부노반 침하량을 날짜별로 정리한 결과이다.

425일간 하부노반에서 발생한 총 압축 침하량은 1.74cm이었다. 2006년 8월 24일까지 발생한 큰 침하(9.3mm)는 상부노반의 하중 증가로 인한 유효응력 증가가 그 원인인 것으로 판

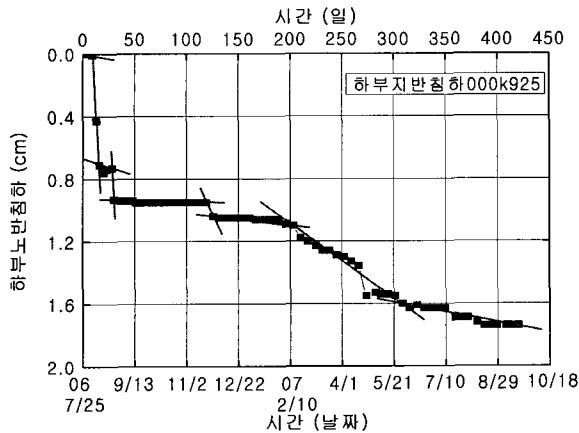


Fig. 15. Lower subgrade settlement (000k925)

단된다. 상부노반 성토 완료 후 침하량이 수렴하는 경향을 보이다가 2007년 2월 13일 이후부터 침하가 다시 증가하여 성토 완료 이후에도 하부노반에서의 침하가 계속 발생하고 있음을 확인할 수 있으나, 점진적으로 침하발생 속도가 감소되고 있는 것을 알 수 있다.

4. 결론

개통 후 발생할 수 있는 침하를 최소화할 수 있는 필요한 모든 방안을 콘크리트궤도 부설 이전에 강구하는 것은 적은 비용으로 향후 발생할 수 있는 유지보수 비용을 저감시킬 수 있다는 측면에서 현명한 선택일 것이다.

경부고속철도 2단계 공사 구간은 일부 토공이 완료된 개소를 중심으로 콘크리트도상 시공을 수행 중에 있으며, 2008년 도 상반기 토공사 완료를 목표로 토공 작업이 진행 중에 있다. 본 논문에서는 공사 중인 현장에서 원지반이 상대적으로 취약하고 고성토로 평가되는 개소에 대하여 성토 시공 중 및 시공 완료 후 1년이 경과한 시점에서 원지반 침하, 지표침하, 하부노반 침하 발생량을 현장 침하 측정 결과를 토대로 정리 분석하였다.

- (1) 시험개소의 476일 동안 계측된 총 원지반 침하 발생량은 10.05cm이었다. 본 시험개소의 현재까지의 계측 결과로부터 원지반 압밀침하는 시공 중에 완료된 것으로 판단된다.
- (2) 5개 지점의 지표침하량 측정 결과를 분석해 본 결과, 최대 지표침하 발생량은 11.8mm이었다. 침하가 많이 발생한 개소의 경우 1개월에 평균 1mm이상의 침하가 발생하였음을 확인할 수 있었다. 최대 침하가 발생한 개소는 시험 개소 중 교대부와 가장 근접한 개소로 뒷채움 공정을 마지막으로 수행하고, 시공속도 빠른 것이 침하 발생의 원인인

것으로 예상되었다.

- (3) 계측기간 동안 하부노반에서 발생한 총 압축침하량은 1.74cm로, 6개월의 방치기간 확보 이 후에도 하부노반 침하가 계속 발생하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 침하 발생 속도는 방치시간 경과와 함께 둔화되고 있음을 확인할 수 있었다. 본 개소의 하부노반에 대한 현 단계에서의 총 압축 변형률은 0.144%로 상당량의 압축변형이 발생하고 있음을 알 수 있었다(상부노반 성토에 의한 변형률 0.077%, 토공완료 후 변형률 0.067%)이었다.
- (4) 침하 발생 급증의 원인을 평가하기 위하여 침하 급증시점과 강우시점이 일치하는 것을 확인한 결과, 추가 상재하중 재하로 인한 침하 급증 지점을 제외하면 두 시점이 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 강우 후 침하속도는 증가하여 1개월에 평균 2mm이상, 최대 5mm까지 침하가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

현 단계에서의 침하 계측 결과는 궤도와 열차하중으로 인한 침하가 반영되어 있지 않다. 상부노반의 침하를 본 연구에서 고려하지 않은 이유는 상부노반에서의 침하가 궤도하중과 열차하중에 의하여 크게 영향을 받을 수 있기 때문으로 이에 대해서는 추가적인 연구를 수행 할 예정이다.

본 시험개소는 경부고속철도 2단계 공사 구간 중 침하가 크게 우려되었던 혼합(암과 흙)성토 구간으로, 혼합성토의 장기침하에 대한 경향을 파악하고자 시험을 수행하고 있다. 본 연구를 통하여 성토체에서 발생하는 장기침하량을 평가하고, 이를 통하여 방치기간 확보 등 적절한 대책을 수립함으로써 콘크리트궤도 건설 후 발생할 수 있는 토공부에서의 침하가 허용잔류침하 기준 범위 이내로 관리될 수 있도록 최대한 노력을 해야 할 것이다.

감사의 글

현장 시험에 많은 도움과 협력을 주신 (주)한국철도기술공사 관계자 여러분과 (주)태성에 감사의 말씀을 올립니다.

참고 문헌

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

(2007년 8월 20일 논문접수, 2007년 10월 10일 심사완료)