

연약지반의 2차압밀 특성에 따른 궤도시스템 선정기준

Selection Criterion of Track System according to Characteristic of Secondary Consolidation in Soft Ground

송호운*, 이일화**, 조국환†

Ho-Wonn Song*, Il-Hwa Lee**, Kook-Hwan Cho†

Abstract Concrete track was applied to Gyeongbu High Speed Railroad step 2 and Honam High Speed Railroad. Concrete track is higher construction cost and lower maintenance fee and runnability than the existing gravel track. For this reason, the use of a concrete track is increased in Korea. But, one of the biggest problems in the concrete track is settlement and reduction of concrete track stability. High speed railroad maintenance standards require the settlement that should be less than 30mm (instant subsidence 5mm, long term settlement 25mm). In order to satisfy criterion of the long term settlement, secondary settlement is considered. The purpose of this study is to evaluate the secondary consolidation settlement with the variation of the secondary consolidation coefficient and thickness of soft ground, to analyze consolidation test data that have probability distribution of the secondary consolidation coefficient and to analyze relationship between concrete track life cycle and secondary consolidation

Keywords : concrete track, secondary consolidation, long term settlement, secondary settlement

경부고속철도 2단계와 호남고속철도에 적용된 콘크리트 궤도는 초기 건설비는 기존 자갈 궤도에 비하여 불리하나, 유지관리 및 주행성은 유리한 것으로 검토되었다. 이와 같은 이유로 콘크리트 궤도는 일반철도 신설구간을 중심으로 점점 더 적용구간이 늘어나고 있는 실정이다. 그러나, 콘크리트 궤도의 가장 큰 문제점 중의 하나인 궤도 하부 노반 침하 및 이로 인한 궤도 안정성 저하는 콘크리트 궤도의 가장 큰 단점이며, 고속철도 유지보수 기준에는 노반의 침하기준을 30mm로 제시(즉시침하 5mm, 장기침하 25mm)하고 있다. 장기 침하기준을 만족하기 위하여는 2차 침하량을 기준치 이내로 관리하여야 한다. 본 연구에서는 2차 침하에 대한 이론을 토대로 연약지반의 2차압밀계수 및 연약지반 층의 두께에 따른 2차압밀 침하량을 산정하고, 압밀 시험 Data를 분석하여 2차압밀계수의 확률분포 특성을 분석하였으며, 궤도의 수명과 2차압밀침하량과의 상관관계를 분석하여, 선정기준을 제시하였다.

주요어 : 콘크리트 궤도, 2차압밀, 장기침하, 2차 침하

1. 서론

콘크리트 궤도는 부담력 및 저항력이 자갈도상궤도에 비하여 매우 크기 때문에 궤도틀림이 거의 발생되지 않아 궤도 보수비용을 대폭 절감시킬 수 있는 궤도구조이다. 또한 양호한 선형을 지속적으로 유지함으로써 고속, 고밀도의 운행선로에서도 차량의 주행안정성이 높고

* 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도시스템공학과 석사과정

** 한국철도기술연구원 첨단인프라 TFT 책임연구원

† 교신저자: 서울과학기술대학교 철도대학원 철도건설공학과 교수(Khcho@seoultech.ac.kr)

이용승객에게 좋은 승차감과 생애주기비용(LCC) 측면에서 유리하다고 평가되어 전통적으로 부설되어온 자갈도상 궤도의 단점을 보완할 수 있는 대안적인 시스템으로 자리 잡아 가고 있다. 국내에서는 터널구간을 중심으로 한 강성노반에서 콘크리트 궤도를 부설한 실적은 많았지만 토공구간에서는 노반 침하에 따른 궤도틀림 발생에 대한 우려로 콘크리트 궤도의 부설실적이 미미하였으며 고속선에서 궤도틀림 발생 및 자갈 비산 등 자갈도상궤도에 대한 문제점이 크게 인식되어 그 대안으로서 콘크리트 궤도 부설이 적극 검토되었고, 경부고속철도 2단계구간 및 호남고속철도 전구간에서 콘크리트 궤도로의 부설을 완료하였거나 추진 중에 있다. 토공구간에서 콘크리트 궤도를 적용하기 위해서는 다양한 설계인자를 추가로 고려하여야 한다. 그 중에서 가장 중요한 사항은 노반의 침하를 기준값 이내로 유지함으로써 차량 및 궤도의 주행안정성을 확보하는 것이다. 콘크리트 궤도는 기존 자갈도상 궤도와 달리 침하가 발생하였을 경우 궤도의 사용성 저하가 크고 대처 방안이 매우 제한적이기 때문에 토공구간에 부설하기 위해서는 장기적인 침하를 엄격히 제한하여야 한다.

콘크리트 궤도의 허용침하 기준은 체결구의 상하조절 여유와 콘크리트궤도의 구조설계상의 허용범위량, 승차감 등으로 결정된다. 체결구의 조절여유량은 30mm를 표준으로 하고 있으며, 체결구의 종류에 따라 변경될 수 있다. 독일과 일본의 경우, 영구 허용침하량을 15~30mm를 기본으로 정하고 있으며, 국내에서는 콘크리트궤도에서의 허용잔류침하량은 30mm 이하로 하며, 허용잔류침하량 30mm는 노반 인수인계 후 예상되는 원지반 침하량과 성토체 침하량 및 궤도구조에서의 침하량(총합 25mm), 그리고 열차하중에 의한 침하량(5mm로 가정)을 모두 포함한다. 이에 본 연구에서는 연약지반의 2차압밀계수 및 연약지반 층의 두께에 따른 2차압밀 침하량을 산정하고, 콘크리트 궤도 수명에 따른 적용성을 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 연약지반

연약지반이란 연약토로 이루어진 지반을 말하며, 이는 점토나 실트 등과 같은 미세한 입자의 흙이나 간극이 큰 유기질토, 이탄, 느슨한 모래 등으로 형성되어 있을 뿐만 아니라, 지하수위가 높아 토공사나 구조물공사를 시행할 경우 일반적인 시공방법에 의하지 않고 별도의 대책과 각별한 주의가 요망되는 지역을 말한다. 연약한 점토 지반에 성토나 구조물을 시공할 경우, 그 하중에 의하여 지반의 간극수가 서서히 배출되어 장기간에 걸쳐 압밀침하가 발생하며, 포화된 느슨한 모래의 경우에는 지진이나 파랑하중 같은 동적하중으로 인하여 액상화 현상이 발생한다. 따라서 연약지반은 연약층의 깊이, 넓이 등의 자연조건과 축조하고자 하는 시설물의 종류, 규모, 시공방법에 따라 검토방안이 마련되어야 하며, 사전에 철저한 현지 확인과 조사를 통하여 가장 확실하고 안전한 시공방안이 수립되어야 한다.

연약지반의 판정기준은 절대적 판정기준은 곤란하나 실무적 견지에서 판정기준은 필요하며, 점성토인 경우 $N=4\sim6$ 이하의 기준이 일반적이며 설계사례 등에 의하면 $N=10$ 으로 한 경우도 있다. 또한, 사질토는 일반적으로 $N=10$ 으로 적용되고 있으나, 이탄질 및 점성토 지반

에서의 N값을 이용한 연약지반 판정은 신중하게 적용하여야 한다. 일반적으로 연약지반의 판정기준은 점토의 경우 연경도(Consistency)로, 모래의 경우 상대밀도(Relative density)로 나타내며, 철도의 경우 노선별로 약 5% 정도가 연약구간을 통과하게 된다. 일반적으로 연약지반은 N치가 4~6이하의 지반에 넓게 분포하여 압밀침하량이 과대할 것으로 예상되는 지반을 대상으로 하지만, 콘크리트 궤도에서는 허용 잔류침하량(30mm)을 만족할 수 없는 모든 지반을 대상으로 하여야 한다. 연약지반에서의 침하는 개량완료 후 수년 또는 수십년에 걸쳐 발생하므로, 압밀침하, 크리프침하에 대한 안정성 및 지층현황, 제반조건이 고려된 기준을 적용하여 교통운영에 지장을 초래하지 않도록 하여야 한다. Table 2.1은 호남고속철도에 서의 연약

Table 2.1 연약지반 판정기준(호남고속철도 설계지침)

구분	이탄질 및 점성토 지반		사질토 지반
층두께	10m 미만	10m이상	
N치	4이하	6이하	10이하
Qu(kN/m ²)	60 이하	100이하	

2.2 2차압밀침하

장기 침하의 주요원인인 2차 압밀은 흙입자의 재배열 등이 주된 원인으로 여겨지며, 주요 영향인자로서 OCR, 경과시간, 상재하중 등이 있다. 2차 압밀은 압축성이 큰 지반에서 크게 발생하고, 사질토 지반에서는 발생량이 매우 작은 것으로 기존 연구에서 알려져 있다.

2차 압축의 발생 시점에 대해서는 두 가지 가설이 존재한다. 가설 A는 2차 압축이 압밀 종료 후에 발생하는 것으로 가정하는 것이며, 가설 B는 2차 압축이 압밀 중에도 지속적으로 발생하는 것으로 가정한다. 하지만, 실제 거동은 두 가지 가설 사이에서 발생한다.(Aboshi, 1973), 가설 B의 경우 수치해석을 수행해야 하므로 적용이 복잡한 반면, 가설 A의 경우에는 적용이 매우 용이하며, 유기질 점토와 같은 화학적 요인에 의해 2차 압축이 크게 발생하는 경우를 제외하면 문제가 없는 것으로 알려져 있다.

2차 압축량을 산정하기 위한 이론적 방법들을 관계식의 형태에 따라 정리하면 아래와 같다.

Table 2.2 2차압밀량 산정을 위한 이론적 방법

creep 이론	관계식	대표적인 방법
Total Strain Model	$\epsilon^c = f(\sigma)g(t)$	$\epsilon_c = C \alpha \epsilon \log(1 + \frac{t}{t_i})$
Time Hardening Model	$\bar{\epsilon}^c = f(\sigma)g(t)$	$\bar{\epsilon}_1 = A \exp(\frac{\bar{\epsilon}}{\alpha q})(1 + \frac{t_i}{t})^m$

Strain Hardening Model	$\bar{\varepsilon} = f(\sigma)g(t)$	$\bar{\varepsilon}_{ij} = \bar{\varepsilon}_{ij}^e + \bar{\varepsilon}_{ij}^{vp}$
------------------------	-------------------------------------	---

이 중, 현재 현장에서는 가설 A를 기초로 한 total strain model 중 C_a 를 이용하여 2차 압축량을 산정하고 있으며, 본 방법은 과압밀에 따른 2차 압축량의 감소를 반영함과 동시에 충분히 보수적인 값을 얻을 수 있다. 압축지수(C_a)를 이용하여 2차 압축량을 산정하는 관계식은 아래와 같다.

$$S_s = \frac{C_a}{1 + e_p} H \log \frac{t_2}{t_1} \quad (\text{식 1})$$

여기서, C_a : 압축지수
 e_p : 압밀 완료시의 간극비
 H : 침하대상 층의 두께
 t_1 : 압밀종료 시점
 t_2 : 2차 압축 고려시간

(식 1) 에서 $C \alpha' = \frac{C_a}{1 + e_p}$ 로 가정하면

$$S_s = C \alpha' H \log \frac{t_2}{t_1} \quad \text{로 나타낼 수 있다} \quad (\text{식 2})$$

3. 2차압축지수와 연약지반 두께에 따른 2차 압밀침하량 산정

3.1 2차 압축지수 및 연약지반 두께와 2차 침하량의 상관관계

본 연구에서는 가정한 식 2를 이용하여 2차압축지수, 연약지반 두께, 퀼도 수명 인자에 따른 2차압밀 침하량의 상관관계를 콘크리트 퀼도 시공 완료 시점으로부터 퀼도의 수명 40년, 60년, 80년, 100년으로 고려하여 검토하였으며, 허용침하량 25mm 지점을 아래 그림 3.1과 같이 나타내었다. 퀼도년수에 따라서 고려한 결과 큰 차이를 보이지는 않았으며, 2차압밀계수 0.0002, 연약지반 깊이 30m 일 경우에서 2차압밀계 0.006, 연약지반 깊이 1m 의 경우 사이의 값이 허용침하량 25mm를 만족하고 있었다. Fig 3.1은 2차압축지수, 연약지반 두께, 퀼도 수명에 따른 2차압밀침하량에 따른 상관관계를 나타내었다.

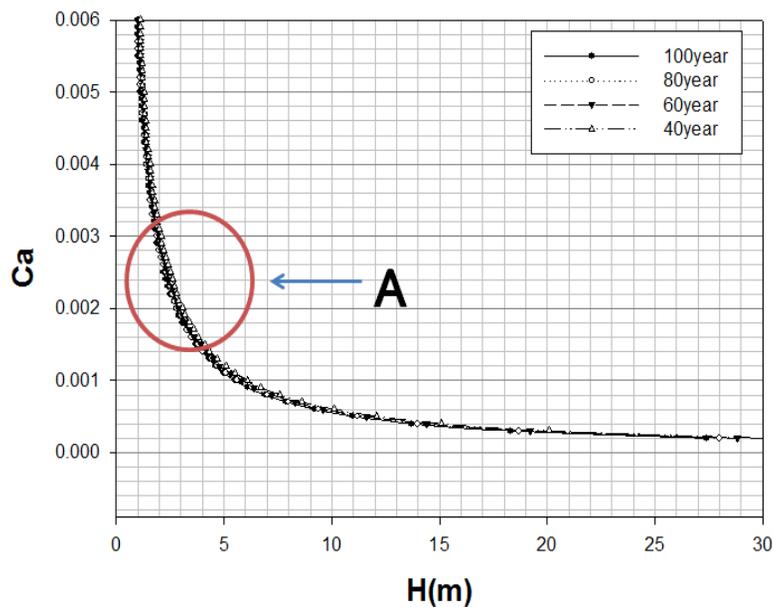
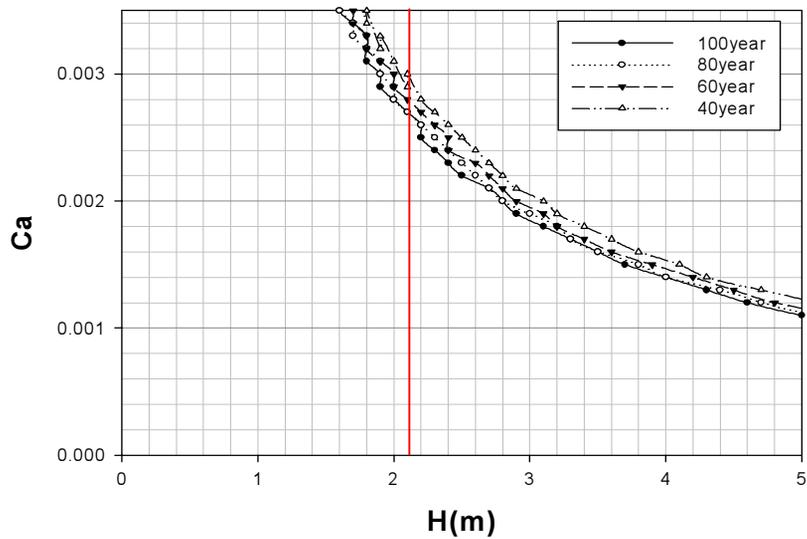


Fig 3.1 2차압축지수, 연약지반 두께, 궤도 수명에 따른 2차압밀 침하량의 상관관계

3.2 확률밀도함수를 고려한 $C\alpha'$ 산정

우리나라 전지역의 2차압밀계수에 대한 data base를 구축하는 것이 좀더 타당하나 자료를 수집하는데 많은 어려움이 있었다. 이에 확률밀도함수를 이용하여 서해안 2공구 지반조사 지질조사 결과를 대표 구간으로 하여 평균과 표준편차를 산정하였다. 확률밀도함수를 이용하여 산정된 평균 $C\alpha'$ 값은 0.003이며 표준편차 0.0026의 분포로 나타났으며, (c)구간의 경우 2차압밀계수가 0.006이 넘어가는 경우로 연약지반 두께에 상관없이 허용침하량 25mm를 넘어가며, (b)구간의 경우 2차압밀계수 0.0002~0.006사이의 값을 나타내며, 연약지반 두께

1m~20m에 따라서 허용침하량을 만족하는 경우와 만족하지 않는 경우를 나타내며, (a)구간의 경우 허용침하량을 만족하는 경우를 나타내었다. 서해선 지반조사의 2차압밀계수 값들의 평균값인 0.003은 Fig 3.1에 나타남과 같이 연약지반 두께 2.1m 이상 나타나는 경우 허용침하량이 넘어가는 것을 알 수 있었다.

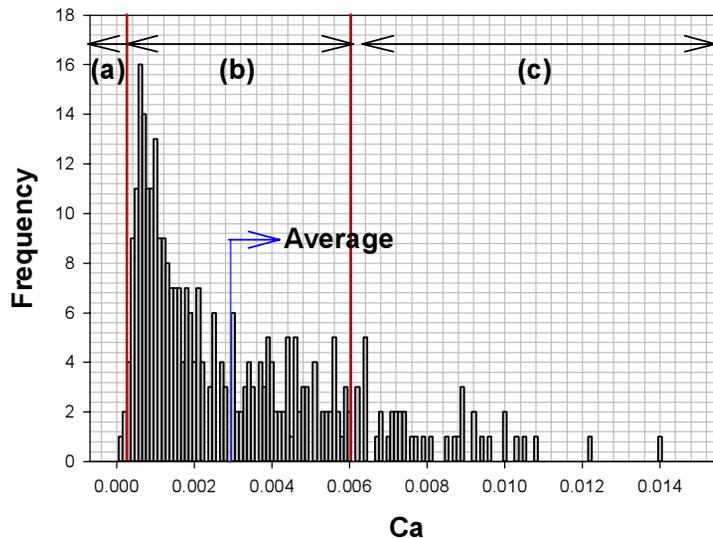


Fig 3.2 확률밀도함수를 고려한 2차압밀계수

4. 결론

본 연구에서는 2차 침하에 대한 이론을 토대로 연약지반의 2차압밀계수 및 연약지반 층의 두께에 따른 2차압밀 침하량을 산정하고, 압밀 시험 Data를 분석하여 2차압밀계수의 확률분포 특성을 분석하였으며, 레도의 수명과 2차압밀침하량과의 상관관계를 분석하였다. 다음과 같은 결론을 도출 할 수 있었다.

- 1) 2차압축지수, 연약지반 두께, 레도 수명 인자에 따른 2차압밀 침하량의 상관관계를 분석한 결과 레도 수명에 따른 압밀침하량은 큰 차이를 보이지 않았으며, 2차압축지수 0.0002의 경우 연약지반 깊이에 상관없이 허용침하량을 만족하였으며, 0.006의 경우는 허용침하량을 넘어감을 알 수 있었다.
- 2) 우리나라 전지역의 2차압밀계수에 대한 data base를 구축하는 것이 좀더 타당하나 자료를 수집하는데 많은 어려움이 있었다. 이에 확률밀도함수를 이용하여 서해안 2공구 지반조사 지질조사 결과를 대표 구간으로 하여 평균2차압밀계수를 산정한 결과 0.003의 값을 나타내었으며, 0.003의 경우는 연약지반 깊이 2.1m 이상 일 경우 허용침하량을 만족시키지 못하므로 주의가 필요하다.
- 3) 본 연구는 연약지반 상 철도의 설계 및 시공을 하는경우 상당히 유용한 자료로 사료되며 향후 추가적인 지반조사를 통하여 우리나라 연약지반의 평균 2차압밀계수의 산정이 필요할것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] 철도기술연구원 이일화 외 (2012) 고속철도 콘크리트궤도 유지보수 기준 정립방안 연구. 한국철도시설공단, PP (2012.5), 7(4), pp. 1-2, 8-9, 24, 162
- [2] 심형섭(2009) 현장계측을 통한 예측기법에 따른 연약지반의 장기침하량 분석, 석사, 한양대학교.
- [3] 한국철도시설공단(2012) 철도설계지침 및 편람
- [4] 이일화, 장승엽, 엄주환(2012) 콘크리트궤도 노반침하에 대한 유지보수 방안, 한국철도학회 pp. 1-7
- [5] 한국철도시설공단 (2012) 서해선2공구 지반조사 보고서