

## 지하수위 저하에 따른 고속철도 토공노반 침하특성에 관한 연구

### A Study on Settlement Characteristics of Earthwork Subgrade with Lowering the Groundwater in High-speed Railway

김 영 하<sup>1</sup> Kim, Young-Ha  
한 상 재<sup>3</sup> Han, Sang-Jae  
정 재 현<sup>5</sup> Jung, Jae-Hyun

엄 기 영<sup>2</sup> Eum, Ki-Young  
박 용 걸<sup>4</sup> Park, Yong-Gul

#### Abstract

Unlike the primary consolidation settlement, the settlement of ground water lowering is not considered separately because of relatively small residual settlement. But the allowed residual settlement (30 mm) of the concrete track in the high-speed railway may be exceeded due to unexpected excessive ground water lowering. This study analyzed the effect of the settlement according to the ground water level change using finite element analysis of stress-pore pressure coupling model, and compared the analysis results with the measured data. As a result, the range of elasticity modulus satisfying the allowable settlement was proposed, and it is suggested that settlement due to ground water level changes should be reflected in the design.

#### 요 지

지하수위 하강에 따른 침하량은 1차 압밀 침하량에 비해 비교적 작기 때문에 잔류침하량 산정시 별도로 고려하지 않는다. 그러나 고속철도 콘크리트 궤도에서의 허용잔류침하량은 30mm로 작기 때문에 예기치 못한 과도한 지하수위 하강으로 인하여 허용잔류침하량을 초과할 수 있다. 본 연구에서는 응력-간극수압 유한요소 해석을 통하여 지하수위 변동에 따른 침하 영향을 분석하여 해석결과와 실측자료를 비교하였다. 그 결과 허용잔류침하량을 만족하기 위한 탄성계수 범위를 제시 하였으며 설계 시 지하수위 저하 영향이 반영되는 것이 타당하다고 판단된다.

**Keywords :** Groundwater, Elastic modulus, Settlement, High-speed railway

- 1 비회원, 서울과학기술대학교 철도전문대학원 박사과정 (Seoul National Univ. of Science & Technology, Graduate School of Railway, The doctor's Course)
  - 2 정회원, 한국철도기술연구원 고속철도인프라연구단장 수석연구원, 겸임교수 (Member, Chief Researcher, Advanced Infrastructure Research Team, Korea Railroad Research Institute)
  - 3 정회원, (주)지구환경전문가그룹 대표이사 (Member, CEO, Expert Group Earth And Environment Co., Ltd., Tel: +82-31-478-4105, Fax: +82-31-478-4115, hansj@ege.co.kr, Corresponding author, 교신저자)
  - 4 비회원, 서울과학기술대학교 철도전문대학원 정교수 (Prof., Seoul National Univ. of Science & Technology, Graduate School of Railway)
  - 5 비회원, (주)지구환경전문가그룹 이사 (Director, Expert Group Earth And Environment Co., Ltd.)
- \* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2015 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

# 1. 서론

고속철도설계기준(2011)에서는 고속철도에서의 잔류 침하량 계산은 1차 압밀과 2차 압밀을 고려하여 산정하도록 규정하고 있으나 지하수위 저하로 인한 침하가 발생할 수 있으며 열차 안전운행에 지장을 주며 복구 및 복원 공사에 추가 비용이 투입될 수 있다.

고속철도의 콘크리트 궤도에서의 잔류침하량은 매우 엄격하기 때문에 적은 침하량에도 궤도 보수를 반복적으로 해야 하는 문제점이 있다. 레일 상단에서의 유지보수 고저차는 13mm로써 토공노반의 허용 침하량 30mm에 비해 더 엄격하다. 궤도와 토공 노반과의 허용 침하 기준 차이는 레일 체결장치 고저조절패드를 이용하여 조정할 수 있으나 패드는 주기적으로 교체를 하여야 하기 때문에 침하에 대하여 근본적인 대책은 아니다. 따라서 침하가 큰 구간에 대해서는 보수·보강공사가 필요하다.

고속철도의 원지반이 점성토인 경우에는 연약지반 개량을 실시하고 노반 성토 완료 후 6개월 이상 방치하며 침하 수렴 여부를 확인 후에 콘크리트 궤도 타설이 이루어진다. 따라서 1차 압밀 침하에 대해서는 충분히 수렴된 것으로 보아도 될 것이다. 2차 압밀은 장기적으로 발생하는 침하 경향이기 때문에 단시간에 발현되지는 않는다. 그러나 지하수위 하강에 따른 침하는 기존 1차, 2차 압밀 침하량의 침하 경향을 따르지 않고 추가 성토 하중과 같이 지하수위 하강속도에 비례하여 침하가 발생된다. Fig. 1은 이와 같은 침하 추세를 보여주는 사례이다. 노반-궤도 인수인계까지는 지표 침하가 발생하지 않았으며 콘크리트 슬래브 시공까지 1mm 침하 되

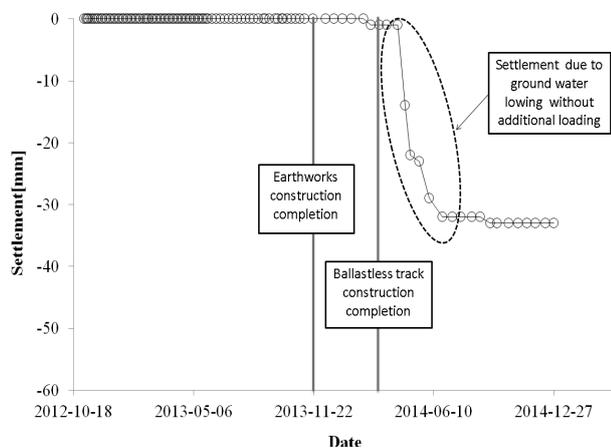


Fig. 1. Settlement due to groundwater lowering (Honam high-speed railway)

었다. 그리고 2014년 4월경부터 급격하게 침하가 32mm 발생 되었다. 기상청에서는 2014년 7월까지 강우량이 평년대비 50~61%수준이라고 밝혔다.

지하수위 저하는 대상층의 유효응력 상승으로 인하여 점성토 뿐만 아니라 사질토에도 침하를 유발 시킨다. 따라서, 설계시 지하수위 하강에 따른 잔류 침하 검토는 점성토 뿐만 아니라 사질토도 고려되어야 하는 사항이다.

Lee 등(2014)은 ABAQUS를 이용하여 호남고속철도 단면을 대상으로 원지반 탄성계수를 15,000kPa로 가정하고 지하수위를 0에서 9m까지 변화시켜 해석하였다. 그 결과 지하수위 최대 변화 폭 9m에 대하여 13.2mm의 침하가 해석되었다. Kerh 등(2003)은 인공신경망 알고리즘을 이용하여 장기적인 지하수위 하강으로 인한 가오송 도시철도 홍선(Red Line)의 침하량을 해석하였다. 지하수위 5m 하강에 따라 침하량이 10~20cm, 10m 하강에 평균 침하량이 66cm로 해석되었다. 원지반층이 SM, CL, ML 등으로 구성되어 있어 고속철도 원지반 요구조건에 만족하지 않는 연약지반이기 때문에 침하량이 크게 해석된 것으로 보인다.

지하수위 하강에 따른 침하 영향을 2차원 평면 변형을 해석을 통하여 지하수위 변화에 따른 침하량에 대하여 사질토를 대상으로 분석하였다. 이와 같은 이유는 콘크리트 슬래브를 채택한 고속철도에서 원지반이 점성토인 경우에는 대부분 양질의 토사로 치환하거나 파일 슬래브 등을 사용하여 개량하기 때문이다. 매개변수는 원지반 탄성계수 및 지하수위 변화 등이다. 해석결과를 검증하기 위하여 호남고속철도 토공 구간에서의 물성 시험자료와 지하수위 및 침하 측정을 해석결과와 비교 검토하였다.

호남고속철도(000k000)의 경우 지하수위 6.3m 하강 후 최대 2.8mm가 실측 침하되었으며 크로스홀 시험결과 원지반 탄성계수는 60,000~200,000kN/m<sup>2</sup>으로써 평균 130,000kN/m<sup>2</sup>이다. 실측 침하량에 가장 근접하는 역해석 결과는 원지반 평균 탄성계수가 100,000kN/m<sup>2</sup> 이상일 경우였으며 크로스홀의 탄성계수 평균과 거의 일치하였다. 따라서 1차 및 2차 압밀이 종료됨을 가정하고 순수하게 지하수위 12m 하강으로 인한 고속철도 최대 허용잔류침하량 30mm를 만족하기 위해서는 원지반 평균탄성계수가 25,000kN/m<sup>2</sup> 이상으로 해석되었다. 식 (1)을 이용하여 허용잔류침하량을 만족하기 위해서 12m 지하수위 하강의 경우 N치는 33, 6m 하강의 경우 16에

해당된다.

본 논문에서는 Table 3과 같이 철도설계기준(2011)에서 규정하고 있는 사질토 원지반의 연약지반 판정기준  $N \leq 10$ 가 허용잔류침하량을 만족하기 위하여 수위 하강에 따른 원지반의 탄성계수 범위 및 최소 요구 N치를 연구하고자 한다.

## 2. 지하수위 변동에 따른 침하 영향 해석

### 2.1 해석조건

고속철도 노반의 1차 압밀 및 2차 압밀 침하량은 실시 설계단계에서 기본적으로 검토하고 있기 때문에 본 논문에서는 1차, 2차 압밀 침하를 제외한 지하수위 하강에 의한 침하 해석에 집중하였다. 지하수위 하강에 의한 침하 영향을 해석하기 위하여 호남고속철도의 표준단면을 이용하였다. Fig. 1에서와 같이 토공 노반 시공시 1차 압밀은 종료 여부 확인하고 6개월 이상 방치 후 토공 노반 상단에 콘크리트 궤도를 타설 하기 때문에 1차 압밀 종료 후 지하수위가 하강된 것으로 가정하였다. 또한 본 논문에서는 순수 지하수위 변동에 의한 침하 영향 분석을 목적으로 하기 때문에 2차 압밀 침하 및 열차 반복하중에 의한 소성침하도 배제하였다.

원지반은 SW 이상의 강성을 가지는 토종을 선택하였다. 철도설계기준(2011)에서는 원지반 조건은  $N > 10$ 을 요구하고 원지반 상층부가 점성토층이 두꺼워 잔류침하량을 만족 못하는 경우 치환, 여성토, 파일슬래브 공법 등으로 연약지반을 처리한다.

설계조건은 Table 1과 같이 허용잔류침하량을 30mm로 하였다. 잔류침하량은 콘크리트 구조물이 타설되는 시점 이후부터의 침하량으로 가정하였다. 노반-궤도 인수인계 직후부터 콘크리트 타설 직전까지의 침하는 HSB (Hydraulic Stabilized Base) 타설 두께를 조절함으로써 보정된다.

기존의 사질토 지반에 대한 침하량 산정법으로 탄성론에 의해 결정되는데 주로 표준관입시험(SPT)의 N치

를 이용하고 있다(DeBeer, 1965). DeBeer 산정식은 사질토층의 유효응력증가량에 N치를 이용해 침하량을 산정한다. 표준관입시험치 N값은 실험 진행자, 지반상태에 따라 정확도의 차이가 발생 할 수 있어 침하량 산정에 영향을 미칠 수도 있다. 본 연구에서는 응력-간극수압 모델을 이용하여 침하량을 산정하였다. Choi(2013)는 열차 반복하중에 의한 성토체 노반의 소성 침하량을 계산하였다. 따라서 유한요소법을 이용한 침하산정은 지하수위 하강과 열차 반복 하중을 동시에 고려할 수 있기 때문에 잔류 침하량 산정에 좀 더 정밀하게 접근할 수 있다.

해석프로그램은 CRISP 기반 소스로 개발된 GeoImprove를 활용하였다(Choi, 2009). 이 프로그램은 연약지반 설계에서 활용되는 압밀 침하 해석 뿐만 아니라 열차반복하중에 의한 소성침하량을 해석 할 수 있는 평면변형 유한요소 해석 프로그램이다. 회복탄성계수를 이용한 열차 반복하중에 의한 탄성 및 소성침하량 해석은 GeoImprove를 이용하여 선행 연구에서 수행되었다(Choi, 2013).

### 2.2 단면 및 물성치 조건

해석단면은 Fig. 2와 같이 콘크리트 궤도인 호남고속철도의 표준 성토 노반 단면을 채택하였다. 지반 물성치는 현장 크로스홀 시험 등으로 도출된 값을 적용하였다(Choi, 2008). 해석에서 사용된 물성치는 Table 2와 같다. 상부노반의 흙재로는 암버럭-토사로써 GW계열에 해당되며, 하부노반과 원지반은 USCS분류법으로 SW의 토종으로 단면을 구성하였다. 레일(Rail), 침목(Sleeper), TCL(Track Concrete Layer), HSB(Hydraulic Stabilized Base)등은 고정 탄성계수를 적용하였으며, 강화노반(Reinforced roadbed;RR), 상부노반(Roadbed;RB), 하부노반(Sub-grade;SG)은 탄성모델을 사용하였다. 강화노반, 상부노반, 하부노반, 원지반의 영 탄성계수(Young's Modulus)는 철도설계기준(2011)에서 제시하는 변형계수( $E_{v2}$ )와 N치를 사용하였다. 고속철도 노반의 최소 변형계수( $E_{v2}$ )는 강화노반의 경우 120,000kPa, 상부노반

Table 1. Design criterion of allowable deformation and strain at roadbed

Design criterion	Criterion	Remark
Allowable elastic settlement ( $\rho_{ea}$ )	Ballasted track : 2.5 mm Concrete track : 2.5 mm	Japan
Allowable plastic settlement ( $\rho_{pa}$ )	Ballasted track : 100 mm Concrete track : 30 mm	Korea

은 80,000kPa, 하부노반은 60,000kPa 이상으로 규정하고 있다. 원지반의 경우에는 N치가 10 초과를 요구하고 있으며 식 (1)과 식 (2)를 사용하여 탄성계수로 환산할 경우 최소 7,660~12,500kPa 이상을 요구한다. 본 연구에서는 원지반의 탄성계수를 매개변수로 하여 최소 탄성계수 평균값 10,000kPa에서 50,000kPa까지 변화하여 수위 하강에 따른 침하 영향을 검토하였다. 지하수위 선은 원지반에 위치하고 있기 때문에 수위 하강에 따른 유효응력 증가량 및 침하량은 원지반의 물성치에 좌우된다.

원지반(Foundation)은 지하수위 변동으로 인하여 침하가 발생할 수 있도록 Mohr-Coulomb 파괴 기준과 관련 흐름 법칙을 따르는 탄소성 재료로 간주하였다.

### 2.3 매개변수

철도설계기준(2011)에서의 원지반 연약지반 판정기준은 Table 3과 같다. 원지반이 사질토이고 표준관입시험 N치가 10 이하인 경우에 궤도 부설 후 잔류침하량 30mm의 만족여부를 설계단계에서 검토하도록 규정하고 있다. 본 논문에서는 원지반이 사질토인 경우에 지하수위 변동에 따라 탄성계수를 Table 4와 같이 매개변수로 하여 침하량을 고려하였다. 사질토 침하의 경우 가장 큰 영향을 미치는 인자는 지반 탄성계수이다. 탄성계수는 KR C-11030(2012)와 Bowles(1977)이 제안한 표준관입시험 N치를 사용한 탄성계수 유추식을 사용하였다.

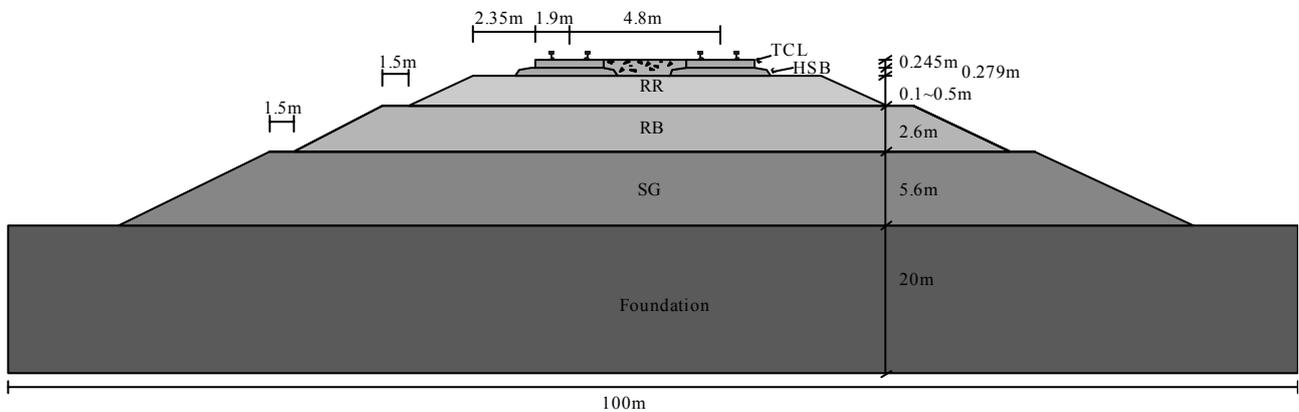


Fig. 2. Drawing of Roadbed

Table 2. Material elastic parameters

Name	Thickness (m)	Young's Modulus (kPa)	Permeability [m/s]	Poisson ratio	Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Material Type
Rail	—	210,000,000	—	0.25	76	Steel
Sleeper	0.095	29,100,000	—	0.25	15	Concrete
TCL	0.245	34,000,000	—	0.25	23	Concrete
HSB	0.279	12,900,000	—	0.25	23	Concrete
RR (Reinforced roadbed)	0.1~0.5	120,000	Drained	0.33	20	GW
RB (Roadbed)	3.0~2.6	80,000	Drained	0.33	20	SW
SG (Sub-grade)	5.0	60,000	Drained	0.33	20	SW
Foundation	20	10,000~50,000	10 <sup>-5</sup>	0.33	19	SW

Table 3. Soft ground criteria

Division	Clay and peat soil		Sandy	Remark
Thickness	< 10 m	≥ 10 m	—	If residual settlement ≥ 30 mm, Soft-ground treatment
N (SPT blowcounts)	≤ 4	≤ 6	≤ 10	
Qu (kN/m <sup>2</sup> )	≤ 60	≤ 100	—	

Table 4. Parameter analysis case

Parameter	CASE	Young modulus [ $kN/m^2$ ]	N (SPT N blowcounts)	
			$E_s = 500(N+15)$	$E_s = 766N$
Elastic modulus [ $kN/m^2$ ] in foundation	CASE A-1	10,000	5	13
	CASE A-2	15,000	15	20
	CASE A-3	20,000	25	26
	CASE A-4	25,000	35	33
	CASE A-5	30,000	45	39
	CASE A-6	35,000	55	46
	CASE A-7	40,000	65	52
	CASE A-8	45,000	75	59
	CASE A-9	50,000	85	65

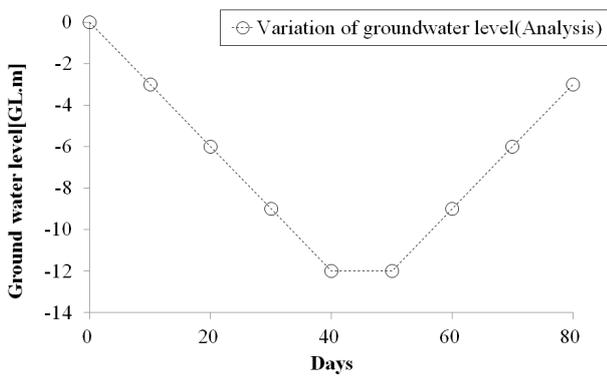


Fig. 3. Change of ground water level (analysis)

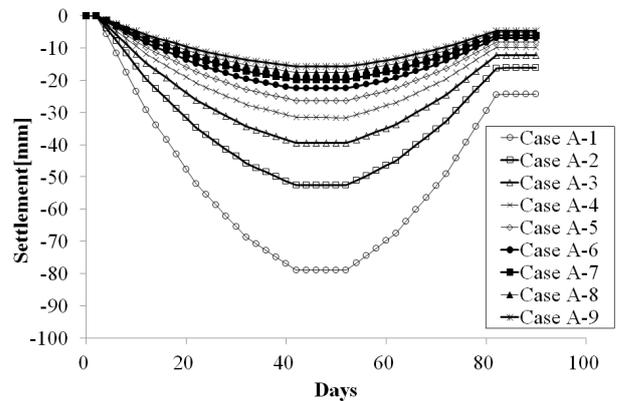


Fig. 4. Settlement according to time series

$$E_s (kN/m^2) = 766N \quad (1)$$

$$E_s (kN/m^2) = 500(N+15) \quad (2)$$

여기서,  $E_s$ 는 탄성계수,  $N$ 은 표준관입시험의  $N$ 치이다. 해석에 사용되는 지하수위 변화 곡선은 Fig. 3과 같다. 최초 40일 동안 12m 지하수위가 선형적으로 하강하고 10일 동안 지하수위 변화가 없는 후 30일 동안 9m 상승하는 것으로 가정하였다. 이와 같이 가정한 이유는 봄 가뭄과 모내기가 시작되는 5월경부터 7월까지 약 90일 동안 지하수위 하강이 매년 반복하기 때문이다. 또한 지하수위는 해석단면에서 동일하게 변화하도록 하였다. 침하 주목점은 성토체 최상단으로 하였다.

## 2.4 해석 결과 분석

Fig. 4는 원지반의 탄성계수 변화와 시간에 따른 침하량을 도시한 것이다. 매개변수는 Table 2와 같이 원지반의 탄성계수를  $10,000 \sim 50,000 kN/m^2$  변경하며 해석하

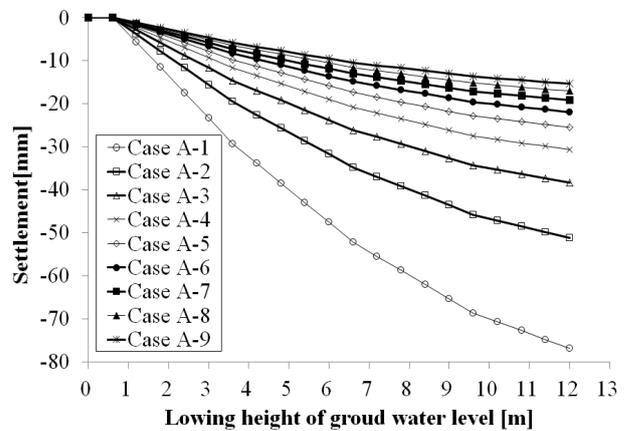


Fig. 5. Settlement according to lowering height of groundwater level

였다. Case A-1은 15.8mm까지 침하하였으며, CASE A-9와 같은 경우 최대 78.9mm까지 침하되는 것으로 해석되었다. 이와 같이 원지반 탄성계수에 따라 침하량이 차이는 이유는 수위 저하로 인한 유효응력 증가에 대하여 즉시 침하가 발생되기 때문이다. 즉시 침하를 추정할 때 탄성 이론을 적용하며, 탄성 이론에 지배하는 인자는

탄성계수이다.

Fig. 5는 지하수위 하강에 따른 침하량을 도시한 그래프이다. Case A-1에서 Case A-9 순으로 침하량이 작아짐을 알 수 있다. 따라서 원지반의 탄성계수가 증가함에 따라 침하량도 작아지는 것으로 해석되었다.

Fig. 6은 탄성계수와 침하량을 도시한 그래프이다. 지하수위가 12m 하강할 경우 콘크리트 궤도의 고속철도 잔류침하기준 30mm를 만족하기 위한 원지반 평균 탄성계수가 25,000kN/m<sup>2</sup> 초과 되어야 하는 것으로 해석되었다.

### 3. 현장 측정과의 비교

#### 3.1 지하수위 하강에 따른 침하량

대상 현장의 지하수위 변동조건은 Fig. 7과 같이 호남

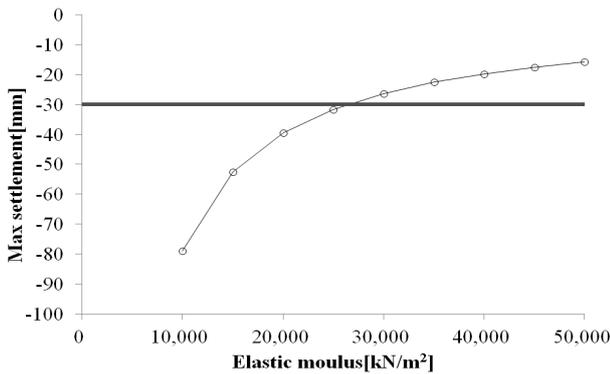


Fig. 6. Settlement according to elastic modulus

고속철도의 000k00 구간의 지하수위 측정 자료를 이용하였다. 약 100일 동안 지하수위가 EL 106.7에서 EL 100.4까지 6.3m 하강 후 약 200일 동안 EL 102.8로 2.4m 상승하였다.

Fig. 8은 대상 지반의 크로스홀 시험 결과중 동적탄성계수를 깊이 별로 도시하였다. 크로스홀 자료와 주상도를 분석하면 GL 15m 이하는 사질토로써 밀도를 19.0kN/m<sup>3</sup>으로 가정하였을 때 동전단계수( $G_d$ )는 16~25MN/m<sup>2</sup>이고 평균 20.5MN/m<sup>2</sup>이다. 동탄성계수( $E_d$ )는 324~874MN/m<sup>2</sup>이고 평균 600MN/m<sup>2</sup>이다. GL 15m 하부의 프아송비( $\nu$ )는 0.48로 일정하였다. 식 (2)와 동전단계수( $G_d$ )를 이용하여 탄성계수 E(Young's modulus)는 깊이 별로 60,000~200,000kN/m<sup>2</sup>로 계산될 수 있다.

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (3)$$

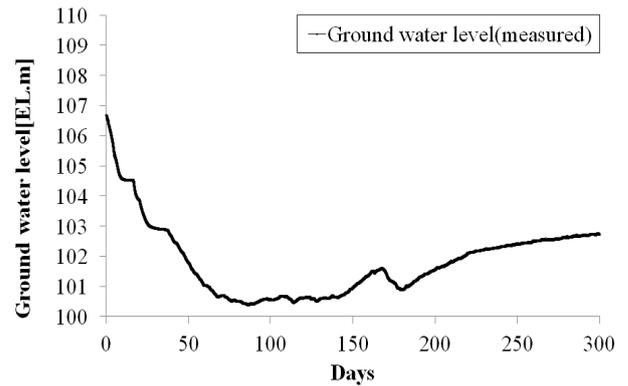


Fig. 7. History ground water level in Honam High-speed railway

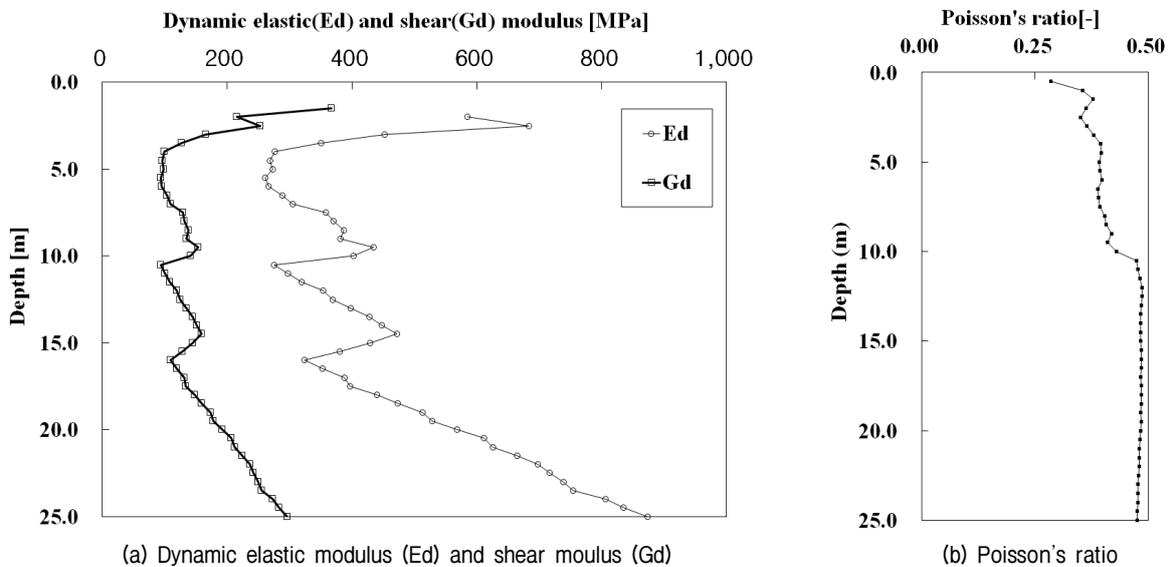


Fig. 8. Result of Cross hole test (Honam High-speed railway)

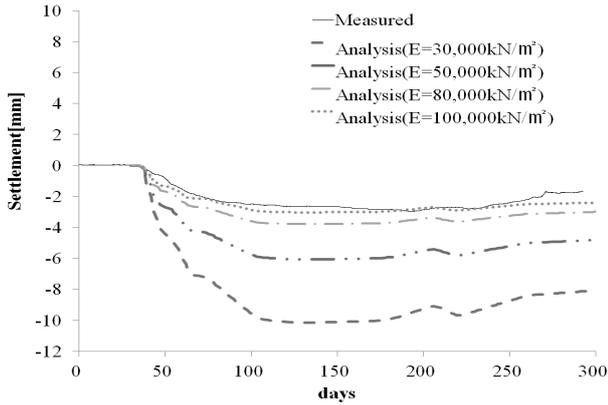


Fig. 9. Compare settlement with measured and analysis

여기서,  $V_s$  = S파속도(S wave velocity),  $G$  = 전단탄성계수(Shear Modulus),  $\rho$  = 밀도(Density),  $\nu$  = 포아송비(Poisson's Ratio) 이다.

Fig. 9는 탄성계수에 따른 실측 침하량과 해석 값을 도시한 그래프이다. 지하수위 측정위치에서의 최대 침하량은 2.8mm로 측정되었다. 침하량 비교 결과 탄성계수가  $100,000kN/m^2$ 일 경우 침하량이 2.9mm로써 실측 침하량과 가장 근접하였다.

Fig. 9는 탄성계수에 따른 실측 침하량과 해석 값을 도시한 그래프이다. 지하수위 측정위치에서의 최대 침하량은 2.8mm로 측정되었다. 침하량 비교 결과 탄성계수가  $100,000kN/m^2$ 일 경우 침하량이 2.9mm로써 실측 침하량과 가장 근접하였다.

### 3.2 N치에 따른 침하량

호남고속철도(000k000)의 경우 지하수위 6.3m 하강 후 최대 2.8mm가 실측 침하되었으며 크로스홀 시험결과 원지반 탄성계수는  $60,000 \sim 200,000kN/m^2$ 으로써 평균  $130,000kN/m^2$  이다. 실측 침하량에 가장 근접하는 역해석 결과는 원지반 평균 탄성계수가  $100,000kN/m^2$  이상일 경우였으며 크로스홀의 탄성계수 평균과 거의 일치하였다. 따라서 1차 및 2차 압밀이 종료됨을 가정하고 순수하게 지하수위 12m 하강으로 인한 고속철도 최대 허용잔류침하량 30mm를 만족하기 위해서는 원지반 평균탄성계수가  $25,000kN/m^2$  이상으로 해석되었다. 식 (1)을 이용하여 허용잔류침하량을 만족하기 위해서 12m 지하수위 하강의 경우 N치는 33, 6m 하강의 경우 16에 해당된다.

Fig. 10은 호남고속철도(0-0공구)에서 원지반 상단에

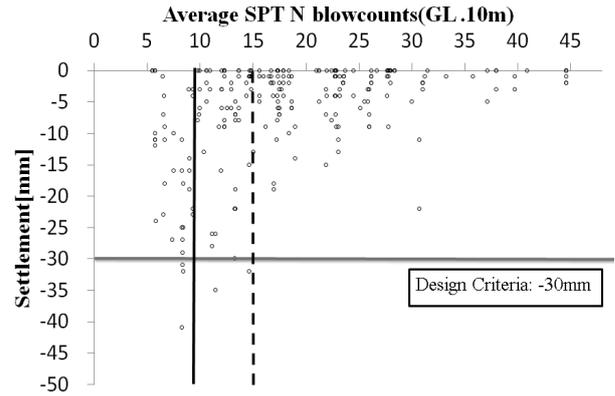


Fig. 10. Compare settlement with average SPT N blowcounts (GL.10 m)

서 GL 10m까지의 평균 N치와 침하량을 도시한 그래프이다. 여기서 침하량은 침하 수렴이 완료됨을 계측을 통해 확인하고 궤도 부설 후의 침하량으므로 1차 압밀 종료 후의 침하량으로 간주될 수 있다. 그림에서와 같이 평균 N치가 15 이하인 경우에도 허용잔류 침하량을 초과하거나 근접하는 침하개소가 있음을 알 수 있다. 허용 침하량에 근접하는 개소는 2차 압밀침하를 고려 하였을 경우 기준치를 초과할 가능성이 크다. 따라서 침하 실측 결과를 통해 지하수위 6.2m 하강에 대하여  $N \leq 10$ 의 연약지반 판정기준은 침하에 대하여 안정하지 못한 것으로 볼 수 있다. 해석결과와 실측결과를 고려하였을 때 원지반의 N치는 16이상 되어야 하며, 연약지반 판정기준은  $N \leq 15$ 이어야 함을 알 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 고속철도 노반을 대상으로 지하수위 변동에 따른 침하량을 수치해석하고 실측데이터와 비교하였다.

- (1) 고속철도 노반의 원지반은 외부 추가 하중 없이 지하수위 변동에 따라 침하 영향을 받기 때문에 잔류 침하량을 만족하기 위해서는 설계시 이를 고려하여야 한다.
- (2) 해석상 지하수위가 12m 하강할 경우 콘크리트 궤도의 고속철도 잔류침하기준 30mm를 만족하기 위한 원지반의 평균 탄성계수가  $25,000kN/m^2$  초과 되어야 하는 것으로 해석되었다. 다만 설계시에는 원지반의 층별 조건, 지하수위의 변동 조건을 고려하여 잔류침하안정성을 검토할 필요가 있다.

- (3) 실측결과와 해석결과를 비교하였다. 호남고속철도(000k000)의 경우 지하수위 6.3m 하강 후 최대 2.8mm가 실측 침하되었으며 크로스홀 시험 결과 원지반 탄성계수는  $60,000 \sim 200,000 kN/m^2$ 으로써 평균  $130,000 kN/m^2$ 이다. 실측 침하량에 가장 근접하는 역해석 결과는 원지반 평균 탄성계수가  $100,000 kN/m^2$  이상일 경우였으며 크로스홀의 탄성계수 평균과 유사하였다.
- (4) 지하수위가 12m 하강하는 경우 N치가 33(탄성계수는  $25,000 kN/m^2$ ) 이상, 6m 하강의 경우 N치가 16 이상 이어야 허용잔류침하량을 만족할 수 있는 해석결과가 도출되었다. 호남고속철도의 경우 지하수위 실측 최대 변화폭은 6.3m 였다. 따라서 평균 N치-침하량 실측 결과를 고려하였을 경우 현행 사질토의 연약지반 판정기준인  $N \leq 10$ (철도설계기준 2013)는 침하에 대하여 안정치 못할 수 있기 때문에  $N \leq 15$ 으로 기준치를 강화 시켜야 할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 논문은 국토교통부 국토교통과학기술진흥원 미래철도 기술개발사업의 연구비지원(과제명: 400km/h급 고속철도 인프라 시범적용 기술개발)에 의해 수행되었으며, 관련자분들께 감사드립니다.

### 참고문헌 (References)

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Railway Design Criterion", 2011.
2. Lee, M.S., Lee, I.W., and Lee, K.M. (2014), "Embankment Immediate Settlement Analysis of Stress and Pore Pressure by Fluctuations of Ground Water Level", *2014 Autumn Conference of the Korean Society for Railway*, pp.1249-1254.
3. Kerh, T., Hu, Y.G., and Wu, C.H. (2003), "Estimation of Consolidation Settlement Caused by Groundwater Drawdown Using Artificial Neural Networks", *Advances in Engineering Software*, Vol.34, No.9, pp. 559-568
4. Choi, C.Y. (2009), "Development of the Integrated Automation Software Development of Railroad Roadbed FEM Analysis & Design", *Railroad track and structure*, No.209, pp.41-47.
5. Choi, C.Y., Choi, W.I, Han, S.J., and Jung, J.H. (2013), "Development of Design Method for Reinforced Roadbed", *Railroad track and structure, Journal of the Korean Geotechnical Society* Vol.9, No.9, pp.55-69.
6. Choi, C.Y., Mok, Y.J., and Shin, E.C (2008), "A Study of Design Standards and Technology to Estimate Optimum Thickness of Earth Roadbeds", *Korea Railroad Research Institute*.
7. Korea rail network authority, "KR CODE 2012", 2012.
8. Bowles, J.E. (1977), "Foundation Analysis and Design", 2nd ed., McGraw-Hill, New York.
9. DeBeer, E.E. (1965), "Bearing Capacity and Settlement of Shallow Foundations on Sand, Lecture No. 3, Proceedings of the Symposium on Bearing Capacity and Settlement of Foundations, Duke University, pp.15-33.

Received : March 12<sup>th</sup>, 2015

Revised : April 16<sup>th</sup>, 2015

Accepted : April 27<sup>th</sup>, 2015