

# 도심지 터널 용출수 발생구간에서의 수리 역해석 및 수리-역학 연계해석을 통한 안정성 해석 연구

박인준<sup>1\*</sup>, 송명규<sup>2</sup>, 신희성<sup>3</sup>, 박용수<sup>4</sup>

## A study on hydraulic back analysis for an urban tunnel site and stability analysis based on hydro-mechanical coupling analysis

Inn-Joon Park, Myung-Gyu Song, Hyu-Soung Shin, Yong-Su Park

**Abstract** Excessive amount of groundwater flowed into tunnel, while constructing Incheon international airport railway. Tunnel passes under subway line no. 2 with only 1.76 m below. To protect the existing structure, TRcM excavation method was applied. As station and construction shaft are already constructed, which are located back and forth of TRcM section, 86.4 ton per day of groundwater inflow is against expectation. To identify mechanism of excessive water inflow, hydraulic back analyses were performed. Then, hydro-mechanical coupled analysis were also performed with the hydrogeologic parameters identified, whose results are investigated for checking the stability of adjacent structures to the tunnel under construction. And a number of mechanical analyses were also performed to check the hydro-mechanical coupling effect. The result from the mechanical analysis shows that subsidence and tunnel ceiling displacement will be 0.85 mm and 1.32 mm. The result of hydro-mechanical couple analysis shows that subsidence and maximum tunnel ceiling displacement will be 1.2 mm and 1.72 mm. Additional displacements caused by groundwater drawdown were identified, however, displacement is minute.

**Keywords:** Back analysis, hydro-mechanical couple, TRcM, groundwater inflow

**요 지** 본 연구는 인천국제공항철도 신철 공사구간 중 서울지하철 2호선 하부에서 TRcM 공법으로 통과하는 구간의 수리 및 굴착 안정성에 대해 검토한 내용이다. 본 검토 대상 구간에서는 터널 굴착과정에서 하루 최대 86.4 ton의 예상치 못한 과다 용출수가 발생하였으며, 과다 용출수의 발생에 대한 원인 분석을 위해 관측정에서 계측된 지하수위 저하거동과 가장 적합한 수리해석 파라미터를 찾기 위한 수리 역해석을 실시하였다. 본 수리 역해석에서는 TRcM 구간에 접한 홍익대학교 정거장 굴착시의 측정된 자료중 TRcM 구간 굴착전까지의 지하수위 계측결과를 사용하였다. 암종별 수리전도계수와 서울지하철 2호선의 배수경계조건, 과업구간의 강우강도 등을 변화시켜가며 수리 역해석을 수행하였다. 그 결과 계측된 자료와 유사한 최종 지하수위 및 지하수위 저하 경향을 보이는 수리해석 조건을 얻을 수 있었다. 다음, 지반의 굴착에 의한 역학적 영향을 분석하기 위해 지하수를 고려하지 않은 역학적 해석을 수행하였다. 순수 역학적 해석 결과, 지표침하 0.85 mm, TRcM 구간 천단침하 1.32 mm 발생하는 것으로 나타났으며, 복합거동 해석결과 지표침하 1.2 mm, TRcM 구간 최대 천단침하 1.72 mm으로 나타나 지하수위 저하에 의해 추가 변위가 발생하나 침하량이 크지 않아 안정성에는 영향이 없는 것으로 분석되었다.

**주요어:** 수리 역해석, 수리-역학 복합거동, TRcM 굴착, 과다 용출수

## 1. 서 론

Terzaghi(1925)는 유효응력의 원리에 의해 연직응력, 유효응력 그리고 간극수압의 관계를 규명하고, 압밀이론에 의해 간극수압의 감소에 따른 유효응력의 증가로부터 지반변형의 발생을 예측할 수 있는 체계를 구축하

였다. 이는 지하수 과다 용출 터널현장에서 주변 지중구조물의 침하발생은 굴착시 발생하는 과다 유출수에 크게 영향을 받을 수 있음을 의미한다. 또한, 터널 굴착, 지하수 양수 등의 활동으로 인해 야기되는 지하수위 저하는 지반침하를 일으켜 지반 및 지표의 건물, 도로, 철도 등의 각종 시설물에 영향을 미칠 수 있다. 유충식과 김선민(2007)은 지하수위 저하로 인한 침하 메커니즘과 침하영향인자에 대한 분석을 수행한바 있으며, 김현태 등(2004)은 연약층 상부에 신설도로 건설시 배수 촉진 공법의 적용에 의한 침하 발생현상에 대해 연구한바 있

<sup>1</sup>정회원, 한서대학교 토목공학과 교수

<sup>2</sup>정회원, 단우기술단, 기술연구소, 부장

<sup>3</sup>정회원, 한국건설기술연구원, 지하구조물연구실, 선임연구원

<sup>4</sup>정회원, 포스코건설, 현장소장

\*교신저자: 박인준 (geotech@hanseo.ac.kr)

다. Song et. al.(2002)은 공극수압과 열응력에 대해 확장된 Hook 법칙 및 확장된 공극수압 확산방정식 등을 이용하여 열-수리-역학 복합거동에 대한 분석을 연구한 바 있다.

이러한 이론적 배경을 기반으로 본 연구에서는 공사 중 발생한 과다 용출수에 대해 주변 지중 구조물의 안전성을 합리적으로 파악하기 위한 단계별 수치해석적 검토를 진행하였다.

본 연구는 인천국제공항철도 신설 공사구간 중 서울 지하철 2호선 하부 TRcM 통과구간의 수리 및 굴착 안정에 대해 검토한 내용이다. 본 검토 대상 구간은 인천국제공항철도 흥익대학교 정거장 구간과 TRcM의 발전기 지 사이로서 천단에서 1.76 m 상부에 지하철 2호선이 위치하고 있다. 흥익대학교 정거장 및 TRcM 발전기지는 건설이 완료된 상태로서, 인접구간의 굴착으로 인한 지하수의 저하로 용출수의 양은 미미할 것으로 예상하였으나 터널 굴착과정에서 하루 최대 86.4 ton의 예상치 못한 과다 용출수가 발생하였다. 과다 용출수의 발생에 대한 원인 분석을 위해 관측정에서 계측된 지하수위 저하거동과 가장 적합한 수리해석 파라미터를 찾기 위한 수리 역해석을 실시하였으며, 이를 바탕으로 상부 구조물 및 지반의 안정성을 검토하기 위하여 수리-역학 복합 거동 해석을 수행하였다.

수리 역해석은 TRcM 구간에 접한 흥익대학교 정거장 굴착시의 측정된 자료중 TRcM 구간 굴착전까지의 지하수위 계측결과를 사용하였다. 암종별 수리전도계수와 서울지하철 2호선의 배수경계조건, 과업구간의 강우강도 등을 변화시켜가며 수리 역해석을 수행하였다.

## 2. 수리-역학 복합거동 이론

### 2.1 Navier 방정식

Navier 방정식은 역학적인 평형상태의 변위에 대한 표현이다. 평형상태의 매질은 외력과 표면력이 평형을 이루고 있으며, 이러한 평형상태는 다음의 평형방정식으로 표현된다.

$$\sigma_{ij,j} + b_i = 0 \quad (1)$$

여기서,  $\sigma$ 는 응력,  $b$ 는 외력이다.

매질내의 응력과 변형율의 관계를 나타내는 Hooke 법칙에 유체의 압력과 열에 의한 열응력을 고려하여 일반화시킨 Hooke 법칙은 다음과 같다.

$$\sigma_{ij} = \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij} + \alpha \delta_{ij} P \quad (2)$$

여기서,  $\lambda$ 는 라미상수,  $\mu$ 는 전단탄성계수,  $\epsilon$ 는 변형율,  $\alpha$ 는 Biot의 커플링 계수,  $P$ 는 공극수압,  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker 델타이다.

위 식에 식 (3)의 응력-변형율 관계식을 대입하여 변위에 대해 정리하면 식 (4)와 같은 역학적 거동 분석을 위한 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3)$$

$$(\lambda + \mu)u_{j,i,j} + \mu u_{i,j,j} + \alpha \delta_{ij} P_{,i} = 0 \quad (4)$$

여기서,  $u$ 는 변위이다.

### 2.2 공극수압 확산 방정식

수리확산 방정식은 유체의 질량 보존법칙의 유압에 대한 표현이다. 매질내의 유체의 부피비 변화율은 경계에 대한 유입/유출량과 내부의 공급원과 같다는 질량보존법칙으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\zeta} + q_{P,i} = \psi_P \quad (5)$$

여기서,  $\zeta$ 는 매질에서의 유체의 부피비,  $q_p$ 는 유체의 유속,  $\psi_P$ 는 유체의 공급원이다.

유체의 부피비 변화율은 수압뿐만 아니라 역학적 변위에 의해서 영향을 받으며, 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\zeta} = -3KM u_{j,j} + \frac{\alpha}{KB} \dot{P} \quad (6)$$

여기서,  $M$ 은 Biot 강성계수,  $B$ 는 Skempton 계수,  $K$ 는 체적탄성계수이다. Biot의 강성계수는 매질의 체적팽창이 억제된 상태에서 단위공극수압의 증가에 따른 유체의 체적비의 증가로 정의된다. Biot 강성계수는 수리전도계수와 함께 매질내의 유체의 과잉공극수압의 수리확산 속도를 결정한다.

압력구배에 따른 유동은 Darcy 법칙에 의해 다음과

같이 표현된다.

$$q_P = -\kappa_{ij} P_{,j} \quad (7)$$

여기서,  $\kappa$ 는 수리전도계수이다.

식 (6)과 (7)을 식 (5)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 수리확산 방정식을 얻을 수 있다.

$$kP_{,jj} + \psi_P = \frac{\alpha}{KB} \dot{P} - 3KM\dot{u}_{,j,j}$$

본 해석에서는 위 식의 우변 2번째 항인 변위에 의한 공극수압 확산영향을 무시함으로써 수리적 거동을 역학적 거동과 독립시키고, 역학적 거동은 과잉공극수압의 확산에 의해 영향을 받는 부분 복합모델을 적용하였다.

### 3. 수리 역해석

본 검토대상구간은 인천국제공항철도 흥익대학교 정거장과 TRcM 발전기지 사이의 구간으로서 기존 지하철 2호선 및 전력구와 통신구의 하부에 약 1.76 m 이격 근접 통과 구간으로 변위발생 억제에 유리한 굴착공법인 TRcM 공법이 적용된 구간이다.

본 구간은 용출수 발생당시 정거장과 발전기지의 건설이 완료된 상태이며, 기존 구조물의 배수조건으로 인해 지하수위가 저하되어 있을 것으로 예상되었던 구간이었으나, 굴착을 진행하던 중 최대 86.4 ton/day의 유입수가 발생하였다. 예상치 못하게 과도한 유입수의 발생으로 인해 지하수위의 저하로 인한 침하가 미칠 기존 지하철, 통신구 및 전력구의 구조적 영향이 우려되었으며, 용출수 발생 및 이후 굴착진행과정에서의 수리 및 역학적 안정성에 대한 검토를 수행하였다.

수리 역해석은 인천국제공항철도 흥익대학교 정거장 구간 굴착중 측정된 지하수위 계측자료를 활용하였으며, 별도의 역해석 알고리즘을 사용하지 않고 시행착오에 의해 수행하였으며, 해석 파라미터는 수리전도계수, 강우강도, 기존 구조물 차수 조건이 사용되었다.

#### 3.1 수위계측 자료분석

인천국제공항철도 흥익대학교 정거장 굴착공사장에서 해석대상 구간과 근접한 수위계측자료 3개의 계측자

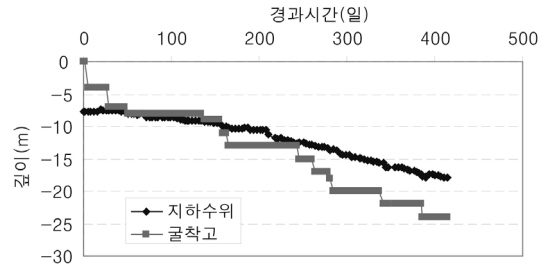


그림 1. 정거장 구간 계측자료

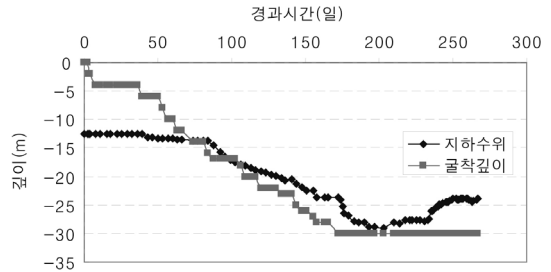


그림 2. TRcM 구간 계측자료 1

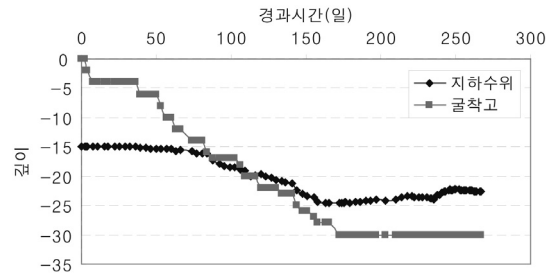


그림 3. TRcM 구간 계측자료 2

료(그림 1, 2, 3)를 역해석의 검토대상으로 하였다. 초기 지하수위는 7~15 m 범위이며, 굴착의 진행에 따라 지하수위 저하가 수일에서 수십일 이내에 반영되는 것으로 나타났다.

#### 3.2 역해석 파라미터 선정

토목학회의 안정성검토보고서(2004)에 수록된 역학적 지반정수 등의 지반조사 결과, 굴착 진행상황 및 계측결과에 따른 굴착시 지하수위 변화 등의 정보는 참값으로 간주하였다.

역해석을 통해서서는 기반암인 연암과 경암의 수리전도

**표 1. 수리물성치 해석 케이스**

수리전도 (cm/sec)	경우 1	경우 2	경우 3
풍화토	$1.0 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-4}$
풍화암	$5.0 \times 10^{-3}$	$5.0 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^{-5}$
연암	$3.0 \times 10^{-3}$	$3.0 \times 10^{-4}$	$3.0 \times 10^{-5}$
경암	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-6}$

**표 2. 기존 지하철 차수조건 해석 케이스**

수리전도 (cm/sec)	경우 1	경우 2	경우 3
차수영역	$2.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-5}$	$2.0 \times 10^{-6}$

**표 3. 강우강도 해석 케이스**

구분(m/sec)	경우 1	경우 2	경우 3
강우강도	$5.0 \times 10^{-9}$	$1.0 \times 10^{-8}$	$\sim 5.0 \times 10^{-8}$

계수, Biot 강성계수, 기존구조물의 차수조건 그리고 강우강도를 추정하고자 하였다. 표 1, 2, 3과 같이 수리전도 계수, 차수조건, 강우강도에 대해 각각 3가지 경우, 총 27개의 수리해석을 수행하여 계측결과와 비교분석하였다.

### 3.3 해석 조건

#### 3.3.1 지반정수

수리-역학 복합거동해석 구간의 지질종단은 그림 4와 같으며, 역학적 물성치는 지반조사에서 분석된 표 4의 지반정수를 사용하였으며 풍화토는 매립토의 물성치와 동일한 물성치를 적용하였다. 압력수두의 소산속도를 결정하는 복합거동 관련 정수인 Biot 강성계수는  $1 \times 10^{-5} (N/m^2)$ 으로 적용하였다.

#### 3.3.2 해석모델

수리 역해석 및 수리-역학 복합거동 해석을 위해서 FLAC3D 2.1을 사용하였으며, 해석 모델은 그림 5와 같다.

### 3.4 해석 결과

#### 3.4.1 역해석 결과

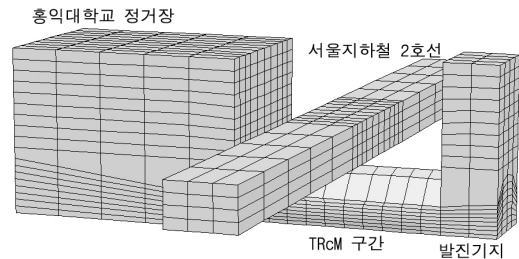
총 27개의 경우에 대해 해석을 한 결과 수리물성 경우 2, 차수조건 경우 2, 강우강도 경우 2의 경우가 그림 6과 같이 계측결과와 가장 유사하게 나타났다. 그림에서 보



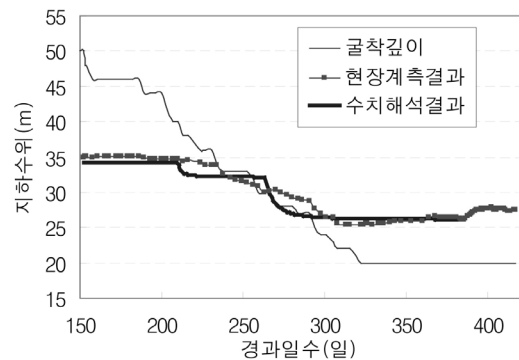
**그림 4. 해석구간의 지질종단**

**표 4. 수리-역학 복합거동해석 지반정수**

구분	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )	변형계수 (MPa)	점착력 (MPa)	마찰각 (°)
매립토	1900	30	0.005	25
풍화암	2000	199.2	0.1	30
연암	2400	669.4	0.3	33
경암	2600	5,817.9	1.5	40



**그림 5. 해석모델**



**그림 6. 수치해석과 계측결과 비교**

이는 바와같이 굴착후 지하수위 저하에 걸리는 시간과 최종 지하수위 깊이가 일치한다는 것은 압력수두의 확산 속도와 강우강도 및 투수계수의 예측이 비교적 정확하다는 것을 의미한다.

### 3.4.2 지하수위 예측 결과

그림 7에서 보이는 바와 같이 정거장 및 발전기 구간은 장기간에 걸쳐 지하수위가 저하되어 있으나, TRcM 구간의 경우는 지하수위가 유지되고 있다. 이는 발전기 지 건설후 TRcM 구간의 굴착까지 소요되는 시간에 비해 수리확산속도가 낮아 과잉공극수압의 확산이 지연되기 때문으로 판단된다.

그림 8은 굴착 완료후의 지하수위 분포로서 굴착에 의해 지하수위가 굴착바닥고까지 낮아진 것을 확인할 수 있다.

### 3.4.3 TRcM 구간 유입량 예측

TRcM 굴착이 진행되는 동안 유입되는 용출량을 굴착 경과일수에 따라서 분석한 결과 그림 9와 같이 굴착 직

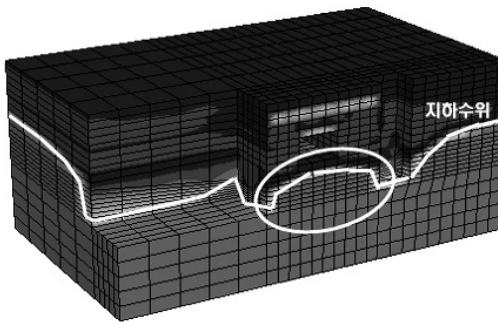


그림 7. TRcM 구간 굴착전 지하수위

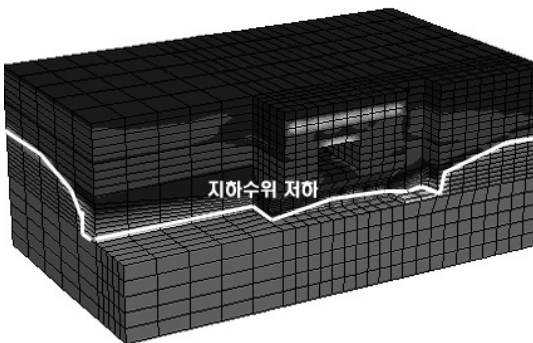


그림 8. TRcM 구간 굴착후 지하수위

후 최대 25 ton/day의 용출량을 보였으며, 굴착후 16 ton/day의 유입량이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 실제 유입량인 86.4 ton/day에 비해 많은 차이를 보이나, 지반의 불균질성, 수치 모델 영역 및 수리 경계조건의 영향에 따른 차이로 추정된다.

## 4. 수리-역학 복합거동

### 4.1 해석개요

수리 역해석을 통해 얻어진 수리 해석 조건을 수리-역학 복합거동 해석에 적용하여 상부 지반 및 기존 지하 구조물의 안정성 해석을 수행하였다.

### 4.2 순수 역학 해석결과

#### 4.2.1 교차부 지표침하 및 터널 천단침하

TRcM 구간 터널 굴착에 따른 지하철 2호선 및 인천

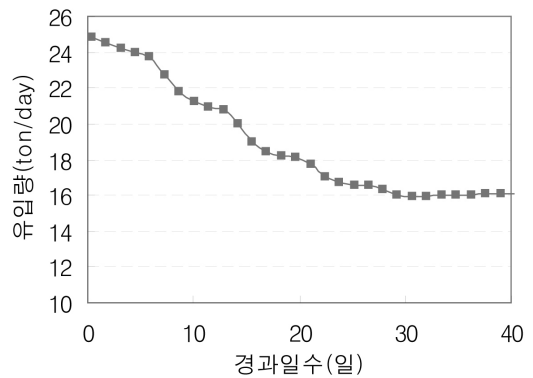


그림 9. TRcM 구간 유입량 예측 결과

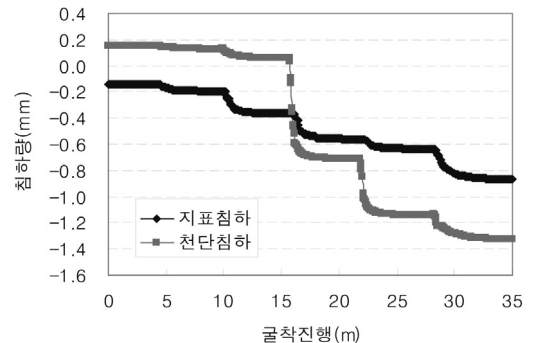


그림 10. 지하철 2호선과 공항철도 교차부의 지표침하 및 TRcM 구간 천단 침하

공항철도 교차부의 직상부 지표에서 발생할 지표침하 및 터널 천단 변위량을 예측한 결과 그림 10과 같이 지표침하량 0.85 mm, 천단침하 1.32 mm 발생하는 것으로 분석되었다. 천단 침하량 측정위치가 TRcM 구간 중앙부에 위치하여 막장이 시점에서 15 m 부근을 지나가면서 천단침하량이 크게 증가한 양상을 보이는 것으로 판단된다.

#### 4.2.2 굴착단계별 지표침하 발생

그림 11과 같이 기존 지하철 2호선의 직상부 지표에서 2호선과 평행하고 TRcM 구간에 수직한 방향으로 횡단방향 지표 침하 측정하였다.

그림 12에 지표침하 발생 경향을 나타내었다. 지하수를 고려하지 않는 순수역학적 해석 결과 정거장 및 발진

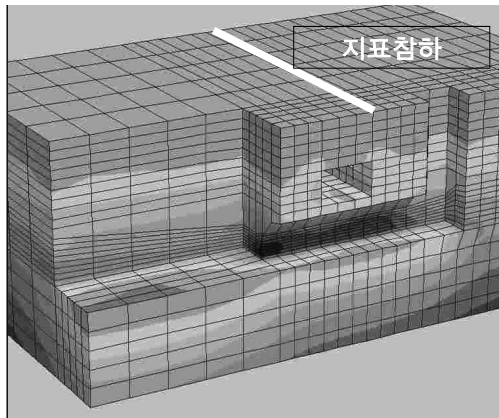


그림 11. 지표침하 측정위치

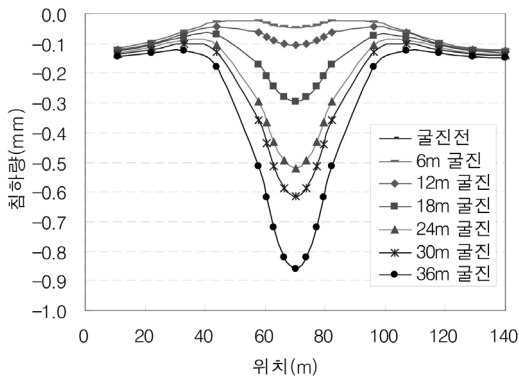


그림 12. 지하철 2호선 상부의 지표침하

기지 굴착과정에서는 미소용기가 발생하였으며, TRcM 구간 굴착과정 초기에는 전형적인 침하와는 차이를 보였으며, 이는 기존 구조물에 의한 영향과 함께 주변부 굴착에 의한 응력교란의 영향으로 판단된다.

최대 침하기울기 1/4484로서 시설안전기술공단 A 등급 기울기 기준치 1/750(우종태, 2006) 이내로 안정한 것으로 분석되었다.

#### 4.3 복합거동 해석결과

##### 4.3.1 교차부 지표침하 및 터널 천단침하

TRcM 구간 터널 굴착에 따른 지하철 2호선 및 인천공항철도 교차부의 직상부 지표에서 발생할 지표침하 및 터널 천단 변위량을 예측한 결과 그림 13과 같이 지표침하량 1.2 mm, 천단침하 1.72 mm 발생하는 것으로 분석되었다. 천단 침하량 측정위치가 TRcM 구간 중앙부에 위치하여 막장이 시점에서 15 m 부근을 지나가면서 천단침하량이 크게 증가한 양상을 보이는 것으로 판단된다.

##### 4.3.2 굴착단계별 지표침하 발생

그림 11과 같이 기존 지하철 2호선의 직상부 지표에서 2호선과 평행하고 TRcM 구간에 수직한 방향으로 횡단방향 지표 침하 측정하였다.

그림 14에 복합거동 해석에 의한 지표침하 발생경향을 나타내었다. 순수역학적 해석 결과 정거장 및 발진기 지 굴착과정에서 지표에 미소한 지표용기가 발생하는 것으로 예측되었으나, 수리-역학 복합거동해석 결과 미

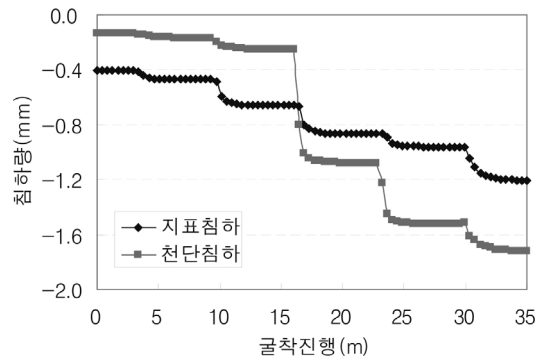


그림 13. 지하철과 공항철도 교차부의 지표침하 및 TRcM 구간 천단 침하

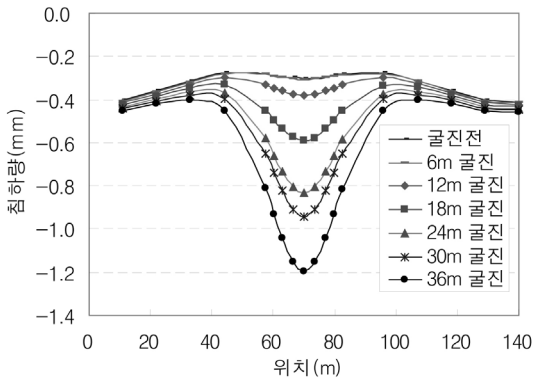


그림 14. 지하철 2호선 상부의 지표침하

소한 지표용기는 발생하지 않아 지하수위 저하에 의한 침하가 용기량을 상쇄한 것으로 판단된다.

최대 침하기울기가 1/3750로서 시설안전기술공단 A 등급 기울기 기준치 1/750(우종태, 2006) 이내로 안정한 것으로 분석되었다.

## 5. 결 론

### 5.1 수리 역해석 결과

- (1) 인천국제공항철도 서울지하철 2호선 하부 통과구간 수리 안정성 검토를 수행하기 위해 계측결과로부터 역해석을 통해 지반의 수리상수를 추정하였다.
- (2) 추정된 지반 수리상수로 지반굴착과정을 분석하여 정거장 및 발전기지의 굴착에 따른 지하수위 저하 경향을 분석한 결과 계측결과와 일치하는 경향을 나타냈다.
- (3) TRcM 본선구간 굴착전후의 지하수위를 분석한 결과 정거장 구간 및 발전기지 굴착후에도 TRcM 구간의 지하수위가 유지되고 있는 것으로 나타났다.
- (4) 수리해석 결과 TRcM구간 굴착중 지하수 유입은 현장 지반조건에 따른 것으로 판단되며, 이후 지하수 유입이 상당기간 유지될 가능성이 있을 것으로 분석되었다.
- (5) 수리해석 결과 최대 25 ton/day가 유입될 것으로 예측되어, 계측치 86.4 ton/day와는 차이를 보이나, 지하수위 저하 경향 및 최종 지하수위가 해석치와 계측치가 유사한 경향을 보여 국부적인 수리전도계수

의 차이 영향 등이 원인으로 판단되었다.

### 5.2 수리-역학 복합거동 해석 결과

TRcM 시공구간에서 지하수 유출에 따른 주요 인접 구조물의 구조적 거동 해석 및 안정성 검토를 수행한 결론은 다음과 같다.

- (1) 순수 역학적 해석결과 정거장 및 발전기지 굴착에 의해 불평형력 발생 및 교란된 응력상태로 인해 굴착단계에서 미소한 지표용기가 발생하는 것으로 분석되었으나, 수리-역학 복합거동 해석 결과 지하수의 저하에 의한 추가 침하영향으로 용기현상은 발생하지 않을 것으로 분석되었다.
- (2) 순수 역학적 해석 결과 지표침하 0.85 mm, TRcM 본선 터널 중앙부 천단침하 1.32 mm 발생하였다.
- (3) 순수 역학적 해석결과 침하 영향 범위는 본선부 좌우측으로 60 m 구간에 해당되며 최대 침하량이 0.85 mm로서 침하 영향은 없는 것으로 분석되었다.
- (4) 복합거동 해석결과 지표침하 1.2 mm, TRcM 본선 터널 최대 천단침하 1.72 mm 발생하였다.
- (5) 복합거동 해석결과 침하 영향 범위는 해석 구간 전체에 해당되며 최대 침하량이 1.2 mm, 침하기울기 1/3750으로 침하 영향은 없는 것으로 분석되었다.

## 감사의 글

본 논문은 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술C01)의 지원일부로 이루어졌습니다. 또한 포스코건설의 지원으로 이루어졌음에 진심으로 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김현태, 강병윤, 김승욱, 정인영 (2004), “대수층이 있는 지반에 도로건설 시 주변지반의 자연침하 사례”, 한국지반공학회 추계 학술발표회, pp. 177-182.
2. 우종태 (2006), 터널계측의 이론과 실무, 구미서관.
3. 유충식, 김선빈 (2007), “터널굴착시 지하수 저하로 인한 지반침하에 관한 연구”, 한국터널공학회, 9권, 4호, pp. 361-375.
4. 토목학회 (2004), 경의선 및 인천국제공항철도 지하철 2

---

호선 상하부 통과구간 안정성 검토 보고서.

5. Cleary, M. P. (1977), Fundamental solutions for a fluid-saturated porous solid, Int. J. Solids Struct., 13:785-806.
6. Song, M. K., Kim, S. R. and Moon, H. K. (2002), A Study on the Boundary Element Method for Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Behavior of Rock Mass, 3rd

Korea-Japan Joint Symposium on Rock Engineering Problems and Approaches in Underground Construction, July 22-24, Seoul, Korea, pp. 661-668.

7. Terzaghi, K. (1925), Principles of soil mechanics, IV-Settlement and consolidation of clay: Engineering News-Record, 95(3), pp. 874-878.



**박 인 준**

한서대학교  
토목공학과  
교수

E-mail: geotech@hanseo.ac.kr



**송 명 규**

단우기술단  
기술연구소  
부장

E-mail: singsong@paran.com



**신 휴 성**

한국건설기술연구원  
지하구조물연구실  
선임연구원

E-mail: hyushin@kict.re.kr



**박 용 수**

포스코건설  
현장소장

E-mail: yspark@poscoenc.com

---