

화강풍화대를 통과하는 슬러리 TBM의 체적손실 산정에 대한 사례 연구

박현구¹ · 오주영¹ · 장석부^{2*} · 이승복²

¹정회원, 삼성물산 건설부문 Civil사업부 과장

²정회원, 삼성물산 건설부문 Civil사업부 부장

Case study of volume loss estimation during slurry tbn tunnelling in weathered zone of granite rock

Hyunku Park¹, Ju-Young Oh¹, Seokbue Chang^{2*}, Seungbok Lee²

¹Samsung C&T Corporation, Civil Business Unit, Manager

²Samsung C&T Corporation, Civil Business Unit, General Manager

ABSTRACT: This paper presents a case study on the ground settlement and volume loss estimation for slurry pressure balanced shield TBM tunnelling in weathered zone of granite rock. Settlement at each stage of shield tunnelling was analyzed and the volume losses and settlement trough factors were estimated from observations. In addition, using the existing volume loss evaluation method in literature, volume losses were estimated considering ground properties and actual driving parameters. Most of ground settlement occurred during passage of shield skin passage and after backfill grouting, and the measured total volume loss and trough curves appeared to coincide with literature. Shield and tail loss obtained from field measurement were found to be around 90% and 60% of the predictions, where tail loss indicated larger deviation than shield loss.

Keywords: Shield TBM, Ground settlement, Volume loss, Field monitoring, Face pressure, Backfill pressure

초 록: 본 논문에서는 화강풍화대를 통과하는 슬러리 TBM 굴진 중 지표 침하 및 체적손실 산정에 관한 사례 연구를 수행하였다. 터널 천단 침하 계측 결과로부터 TBM 굴진 단계별 침하 발생 경향을 분석하였고, 횡방향 지표 침하 트라프로부터 굴진 중 체적손실 및 트라프 변수를 산정하였다. 또한, 체적손실 산정 모델을 이용하여 지반 특성과 굴진 중 측정된 기계데이터가 반영된 굴진 단계별 체적손실을 산정하였으며, 이를 실제 계측 결과와 비교·분석하였다. 슬러리 TBM의 경우 대부분의 지표침하는 쉴드 본체 통과 및 뒤채움 주입 이후 발생하는 것으로 나타났고 문헌에 보고된 총 체적손실 및 트라프 곡선 형태가 확인되었다. 실제 굴진 중 체적손실은 굴진 단계별로 쉴드손실 예측값의 90%, 테일부 손실 예측값의 60% 수준으로 분석되었고, 쉴드 손실에 비해 테일부 손실의 편차가 큰 것으로 나타났다.

주요어: 쉴드TBM, 지표 침하, 체적손실, 현장 계측, 막장압, 뒤채움압

1. 서 론

도심지 터널 시공 중 지반 침하 관리 요구가 증대됨에 따라 밀폐형 쉴드 TBM (closed-type shield tunnel

boring machine) 공법의 적용이 확대되고 있다. 쉴드 TBM 공법은 막장면 지지 방법에 따라 크게 EPB (earth pressure balanced) TBM과 슬러리 TBM으로 나뉜다. EPB TBM은 막장면 커터헤드(cutter head) 후방 챔버(chamber) 내 굴착 토사 및 암반에 의해 발생하는 토압으로 막장면을 지지하며 일반적으로 지반의 투수계수가 낮은 세립토 지반에 적용된다. 슬러리 TBM은 가압된 벤토나이트 슬러리 등의 유체를

*Corresponding author: Seokbue Chang
E-mail: seok.chang@samsung.com

Received December 15, 2015; Revised January 4, 2016;
Accepted January 8, 2016

이용하여 막장면을 지지하며, 투수성이 큰 토사지반 또는 암반과 토사가 혼재하는 복합 지반 조건에 적용된다.

셸드 TBM 시공에 따른 침하 예측 및 관리를 위한 기준 체적손실은 기존의 시공 사례로부터 얻어진 경험적 값에 기초하여 산정되고 있다. 미국, 영국, 홍콩, 싱가포르 등을 중심으로 체적손실 가이드라인이 제시되었으나, 대부분 지반 분류에 따른 체적손실 값만 제안되었기 때문에, 굴진 단계 및 운전 조건이 체적손실에 미치는 영향은 고려되지 못하였다(Mair and Taylor, 1997; FHWA, 2009; MTR Corporation, 2011; Land Transport Authority, 2013). 따라서 실제 셸드 TBM 굴진 중 지표침하 관리를 위한 운전 조건 결정과 관련하여 운전조건을 고려할 수 있는 체적손실 모델에 기초한 지표침하 예측 결과 분석이 수행되어야 한다.

기존의 셸드 TBM 굴진 중 체적손실 산정관련 연구는 현장 침하 예측에 대한 분석 위주로 수행되었다. 많은 사례에서 횡방향·종방향 지표침하계측 배열로부터 측정된 지표침하에 대한 곡선 맞춤으로 체적손실 값과 터널중심에서 침하 트라프의 변곡점까지의 거리인 트라프 폭 i 를 추정하는 방법이 적용되었다(Sugiyama et al., 1999; Fagnoli et al., 2009; Jones, 2010). 많은 연구에서 굴진 단계별로 막장면-셸드-테일부 침하의 순차적 발생이 확인되었으며 기존 문헌에서 제안된 트라프 폭 범위와 예측값 간 비교 분석이 수행되었다. 또한, 굴진 단계별 체적손실과 막장압, 뒤택음압, 뒤택음 주입체적 등의 TBM 기계데이터와의 상관성 분석에 대한 연구 또한 수행되었다(Fagnoli et al., 2009; Wongsaroj et al., 2013). 그러나 해당 연구에서 제시된 체적손실-운전데이터 간 상관관계 분석 방법은 지반 특성에 대한 정량적인 고려가 미흡하여 일반적으로 적용하기에는 어려움이 있다. 한편, Suwansawat (2002)과 BouBou et al. (2008)은 인공 신경망을 이용하여 EPB TBM 굴진 중 발생하는 기계 데이터와 지반조건이 고려된 체적손실 및 지표침하 산정모델을 제안하였으나 일반적인 적용에는 한계가 있다.

본 연구에서는 차별평화가 진행된 화강암 지반을 통과하는 슬러리 TBM 굴진 중 발생하는 지표침하의 거동 분석 및 체적손실 산정을 수행하였다. 횡방향 지표침하 계측 배열을 이용하여 굴진 중 체적손실 및 트라프 폭을 역산정하였으며, 천단 상부 지표 계측 결과로부터 굴진 단계별 침하 발생 경향을 분석하였다. 또한, Loganathan (2011)이 제안한 체적손실 산정 모델을 이용하여 지반 특성과 굴진 중 측정된 기계데이터가 반영된 굴진 단계별 체적손실을 산정하였으며, 이를 이용하여 실제 계측 결과 분석 및 합리적 체적손실 산정을 위한 방안에 관한 논의를 수행하였다.

2. 셸드 TBM 굴진 중 침하 및 체적손실 발생 거동

2.1 체적손실과 지표침하와의 관계

터널 굴착으로 인한 지반의 응력 해방은 굴착면 내측 방향으로 지반 변형을 유발하며 이로 인해 체적손실이 발생한다. 이 체적손실에 의한 영향은 터널 상부로 전달되고 얇은 터널의 경우 이러한 영향은 지표침하의 형태로 나타나며, 이때 발생하는 지표침하량은 일반적으로 체적손실에 비례한다(Fig. 1). 지반조건에 따라 체적손실과 지표침하 트라프의 체적간에는 다소 차이가 있으나, 보편적으로 동일하다는 가정하에 지표침하가 산정된다. 따라서 체적손실(V_L)은 단위 굴진 길이에 대한 지표침하 트라프의 체적(V_s)를 터널 단면적 $A_t(= \pi \cdot D^2/4)$ 로 나눈 값으로 정의된다($V_L = V_s / A_t \times 100\%$).

Peck (1969)과 Schmidt (1969)에 따르면, 터널 막장면에서 충분히 이격된 후방에서의 횡방향 지표침하는 터널 중심축을 중심으로 가우스 분포곡선 (Gaussian distribution curve) 형태를 나타낸다(Fig. 1). Peck (1969)은 터널 중심축으로부터 횡방향 거리 y 와 지표침하 S 간 관계를 식 (1)과 같이 정의하였다.

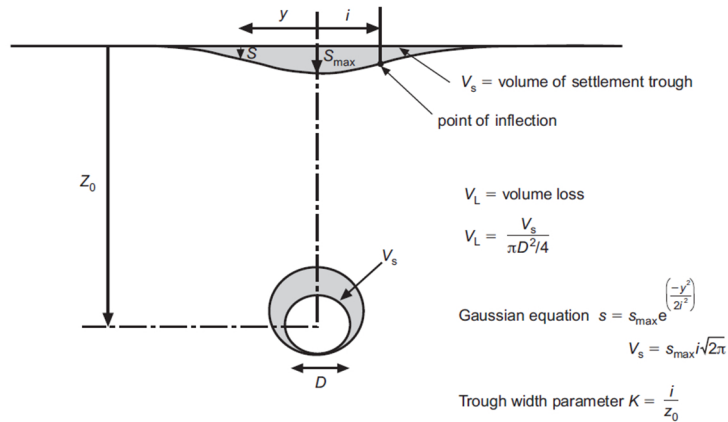


Fig. 1. Volume Loss and Surface Settlement

$$S = S_{\max} \cdot e^{\left(\frac{-y^2}{2i^2}\right)} \quad (1)$$

$$S(y) = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} \cdot i} \cdot e^{\left(\frac{-y^2}{2i^2}\right)} = \frac{V_L \cdot A_t}{100 \sqrt{2\pi} \cdot i} \cdot e^{\left(\frac{-y^2}{2i^2}\right)} \quad (3)$$

여기서, S_{\max} 는 터널 중심축 상부에서 발생하는 최대 침하, i 는 횡방향 침하 트라프 폭을 의미한다.

침하 트라프의 체적 V_s 는 식 (1)의 적분에 의해 아래의 식 (2)와 같이 정의 된다.

$$V_s = \int_{-\infty}^{+\infty} S dy = S_{\max} \cdot i \cdot \sqrt{2\pi} \quad (2)$$

위의 식 (1)과 식 (2)로부터 횡방향 지표침하 트라프는 식 (3)과 같이 정의된다.

2.2 쉘드 TBM 굴진에 따른 침하 거동

Fig 2는 쉘드 TBM 굴진 중 발생하는 종방향 침하 발생 양상의 개요를 나타낸다(Sugiyama et al. 1999). 쉘드 TBM의 위치에 따라서 다른 침하양상을 보이며, 이는 지반 경계 조건의 변화, 쉘드 TBM 운전조건 및 장비조건에 따른 체적손실(막장손실, 쉘드손실, 테일부 손실)에 기인한다. Step 1은 선행침하로 쉘드 TBM 굴진의 영향권 밖에서 발생하는 침하로 지하수

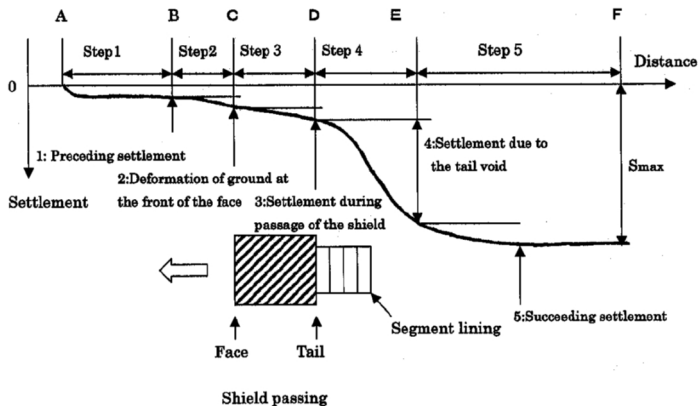


Fig. 2. Surface Settlement caused by shield tunneling (Sugiyama et al., 1999)

위 변화가 주원인인 경우가 많으며, 밀폐형 쉴드 TBM의 경우 지하수압이 유지되므로 선행침하의 크기는 매우 미미하다. Step 2는 막장손실로 인한 침하로써, 챔버압 관리와 관계하며 챔버 내 토압관리가 적절한 경우 막장 전 침하 발생은 크지 않다. Step 3은 쉴드 TBM이 통과할 때 발생하는 침하로 쉴드와 지반사이의 간극 크기와 쉴드 TBM의 자세제어(pitching, yawing)에 의한 쉴드손실에 의하여 발생한다. Step 4는 테일 보이드(tail void)에 의해 발생하는 침하로, 뒤채움 그라우팅 주입 및 이후 거동 특성에 따라 침하량이 결정된다. 마지막으로 Step 5는 후속침하로 쉴드 TBM 굴진에 의해 발생한 지반 내 간극수압의 소산되면서 발생하는 압밀침하가 대부분으로 투수성이 좋은 지반에서는 그 크기가 미미하다

2.3 쉴드 TBM 굴진 시 체적손실 발생 경향

투수성이 좋은 지반에 밀폐형 쉴드 TBM이 적용되는 경우 지표침하는 주로 Fig. 2의 Step2~Step4 과정에서 발생하는 체적손실에 기인한다. 쉴드 TBM 시공 중 체적손실의 정량적 산정과 관련하여, Lee et al. (1992)은 Gap 모델을 제안하였다. 이 모델에 따르면 막장손실(face loss)은 지반의 응력 상태 (토압, 수압), 강성 및 강도, 그리고 막장압의 크기에 의해 결정되며, 쉴드손실(shield loss) 및 테일부 손실(tail loss)은 각각 굴착 주면과 쉴드 본체/세그먼트 링 외면 사이에 형성되는 간극의 크기로부터 산정된다. 그러나, Lee et al. (1992)은 실제 쉴드 TBM 굴진 중 쉴드 및 테일부에서 발생하는 현상을 반영하지는 못하였다. Bezuijen and Bakker (2007)은 실험적 연구를 통하여 슬러리 TBM의 경우 EPB TBM과 달리 슬러리 유체가 굴착 주면과 쉴드 본체 사이의 공극에 유입되어 쉴드 주변 지반을 지지함을 확인하였다. 또한, 뒤채움 그라우팅이 굴진과 동시에 수행될 경우, 테일부 손실은 테일 보이드의 크기뿐만 아니라 뒤채움 재료의 압축거동 및 그라우팅 압력의 소산에 의해 발생함을 확인하였다. Ingles (1972)와 Lagerblad et al. (2013)은 실내·현

장 시험으로부터 그라우트의 압축율은 3~10% 범위에 분포함을 확인하였으며, Bezuijen and Bakker (2007)은 그라우팅 압력은 초기 주입압력으로부터 지하수압을 다소 상회하는 크기까지 소산되는 것으로 확인되었다. 이에 따라 Loganathan (2011)은 실제 쉴드 TBM 굴진 중 거동을 고려한 체적손실 산정 모델을 제안하였으며, Lee et al. (1992)의 Gap 모델과 대비하여 슬러리 TBM의 쉴드손실 산정 시 슬러리압에 의한 지지 효과 반영 및 뒤채움 재료의 수축을 10%를 가정한 테일부 손실 산정 방안이 추가적으로 제시되었다.

3. 체적손실 산정 방안

3.1 침하 계측 결과로부터 체적손실 산정

본 연구에서는 횡방향 지표침하계측 배열로부터 측정된 지표침하에 대한 가우스 곡선 맞춤(Gaussian curve fitting)을 수행하여 총 체적손실 V_L 과 트라프 폭 i 를 추정하였다. 한편, 쉴드 TBM의 굴진 단계별 체적손실 산정과 관련하여, 막장면, 쉴드 본체 통과, 테일부 뒤채움 단계별(Fig. 2의 Step2, Step3, Step4) 침하 ΔS_v 에 대하여 식 (4)를 적용하여 체적손실을 산정하였다.

$$\Delta V_{L,\Delta} = \frac{\sqrt{2\pi} \cdot i \cdot \Delta S_v}{A_t/100} \quad (4)$$

3.2 굴진데이터를 이용한 체적손실 예측

본 논문에서는 Loganathan (2011)이 제안한 체적손실 산정 모델을 적용하여, 쉴드 TBM의 운전조건에 따른 체적손실을 산정하였다.

(1) 막장손실 산정

쉴드 TBM 굴진 중 막장손실 발생은 굴착면에서의 응력이완으로 인한 막장면 내부 방향 지반 변형에 의해 발생하며, 식 (5)로부터 산정이 가능하다.

$$V_{L,f}(\%) = \frac{U_f}{R} \times 100 = \frac{k_s}{2R} \frac{\Omega R P_0}{E_u} \times 100 \quad (5)$$

여기서, E_u 는 굴진 지반의 비배수 탄성계수, R 은 터널 반경, U_f 는 막장면 내부로 밀려나오는 지반의 체적을 터널 단면적으로 나눈 값, P_0 는 터널 막장에서 전응력(net pressure) 감소분, k_s 는 지반과 쉴드 챔버간 마찰 저항과 관련된 변수로서 표준관입시험치 N 10이상의 지반에서 대해 0.7, 결정계수 Ω 는 식 (6)로부터 같이 산정된다.

$$\Omega = \begin{cases} 1.12, & N_R < 3 \\ 0.63N_R - 0.77, & 3 < N_R < 5 \\ 1.07N_R - 2.55, & N_R > 5 \end{cases} \quad (6)$$

여기서 N_R 은 stability ratio로 식 (7)로부터 산정되며, 식 (7)에서 P_i 는 막장압, H 는 터널 스프링 라인의 심도, 그리고 C_u 는 스프링 라인에서 막장면 지반의 비배수 전단강도이다.

$$N_R = (\gamma H - P_i) / C_u \quad (7)$$

(2) 쉴드손실 산정

슬러리 TBM의 경우 굴진 중 지반-쉴드 간 간극에 슬러리가 유입되므로, 쉴드 손실 산정 시 막장면에서 과굴착과 쉴드의 형상으로 인해 발생하는 지반-쉴드 간 간극과 쉴드 주변부 슬러리 압력을 고려한 내공방향 변위로부터 각각 최대·최소 쉴드손실을 산정할 수 있다. Loganathan (2011)은 식 (8)과 같이 쉴드의 원뿔형상을 고려하여 최대·최소변형의 50%값을 체적손실 산정에 적용하였다.

$$V_{L,sh}(\%) = \begin{cases} \frac{(t_b + t_t)}{2R} \times 100, & U_s > t_b + t_t \\ \frac{U_s}{2R} \times 100, & U_s > t_b + t_t \end{cases} \quad (8)$$

여기서, t_b 는 과굴착 두께, t_t 는 쉴드 본체 시작부와 선단의 외경 차이, U_s 는 쉴드 내공방향 변위로 식

(9a)로부터 결정되며 σ_v 는 터널 스프링라인에서 전응력을 의미한다.

한편, 지반의 정지토압계수(K_o)가 1이 아닌 경우, 천단부와 측벽부 지반 응력이 상이하므로, 내공변위는 원형이 아닌 타원형으로 발생하게 되며 이때 내공 변위 U_s 는 식 (9b)로부터 산정될 수 있다.

$$U_s = R(t_b + t_t)(1+v) \frac{\sigma_v - P_i}{E_u}, K_o = 1 \quad (9a)$$

$$U_s = R(t_b + t_t)(1+v) \sqrt{\frac{\sigma_v - P_i}{E_u} \cdot \frac{K_o \sigma_v - P_i}{E_u}}, K_o \neq 1 \quad (9b)$$

(3) 테일부 손실 산정

쉴드 테일부에서의 동시 주입을 수행할 경우, 테일부 손실은 그라우팅 재료의 압축 거동으로 인해 발생한다. 이와 관련하여 뒤채움 그라우트 체적 압축율은 기존 연구로부터 3~10%로 알려져 있다(Ingles, 1972; Lagerblad et al., 2013), Loganathan (2011)은 식 (10)과 같이 그라우트 체적 수축량 10%에 해당하는 내공방향 변위를 고려한 체적손실 산정 방안을 제시하였으며, 여기서, t_v 는 테일 보이드의 이론적인 두께를 의미한다.

$$V_{L,t}(\%) = \frac{0.1 \times t_v}{R} \times 100 \quad (10)$$

4. 터널 및 지표침하 예측 현황

4.1 터널 현황 및 지반 조건

본 연구에서는 OO 지역 지하철 공구의 슬러리 TBM 터널 구간 중, 충적토-풍화토-풍화암 지역을 통과하는 300 m 연장에 대한 지반 침하 분석을 수행하였다. 해당 구간은 Fig. 3에 도시된 바와 같이 차별 풍화된 화강암(moderately/completely decomposed granite, MDG/CDG)을 기반층으로, 상부에 충적층

(alluvium)과 매립층(fill)이 형성된 지반 조건을 나타내며, 해안가 인근에 위치하여 지하수위는 지표면 부근(지표 하 2~3 m)에 형성되어 있다. 터널의 굴착 직경은 7.45 m이고, 세그먼트 내공 직경은 6.8 m이다. Fig. 3에 함께 도시된 터널 종단 기준으로, 터널 심도(중심축 기준)는 지표 하 15~22 m에 분포하며, 토피고는 11~19 m로 터널 직경(D)의 1.5~2.5배 범위에 해당한다. 터널은 대부분 풍화토-풍화암에 해당하는

CDG층을 통과하며, 일부 구간(Ch.700-Ch.770)에서는 붕적층을 포함한다.

Fig. 4는 터널 중심 심도에서 표준관입시험치 N값의 평균치를 나타낸 것으로써, CDG층 통과 구간에서 40~60, 붕적층을 포함하는 구간에서는 30~35 값을 갖는 것으로 조사되었으며, 주요 지반 물성은 Table 1과 같다.

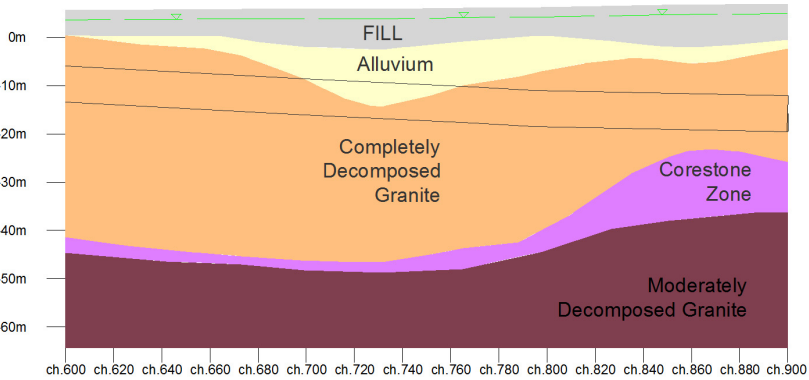


Fig. 3. Longitudinal Geological Profile and Tunnel Alignment

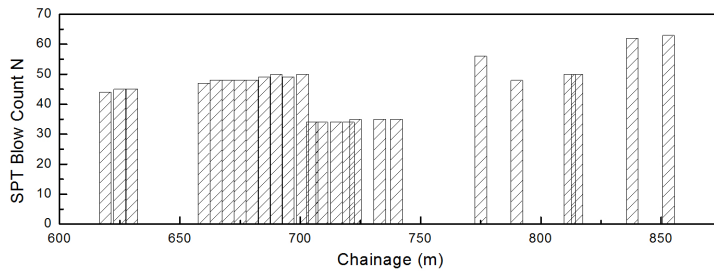


Fig. 4. SPT blow count along tunnel chainage

Table 1. Ground Properties

Ground Type	Unit Weight (kN/m ³)	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio (ν)	Cohesion Intercept (kPa)	Friction Angle (ϕ)	Coefficient of Earth Pressure at Rest, K_0
Fill	19	1.5N	0.25	1	35	0.4
Alluvium	19		0.25	1	35	
CDG	19		0.25	8	38	
HDG	19		0.25	12	40	
MDG	26		0.25	50	45	

N: Blow count of Standard Penetration Test

4.2 TBM 장비 제원 및 운전 조건

터널 시공에 적용된 TBM 장비는 슬러리 TBM으로 주요 제원은 Table 2와 같다. 스킨-지반사이의 간극은 25 mm, 테일 보이드는 150 mm이며, 2-component 뒤채움 그라우팅을 이용한 동시 주입이 수행되었다.

Fig 5는 굴착 중 기계데이터를 나타낸 것으로, 막장압(face pressure)의 경우 막장안정성 검토에서 산정된 목표압력(target pressure)과 일치하도록 터널의 토피고와 비례하여 증가되는 것으로 운용되었으나, 뒤채움압력(backfill pressure)의 경우 낮은 토피고(< 2D) 구간에서의 과도한 침하 발생을 억제하기 위하여 계측 구간 내 최대 토피고 지점(Ch.875)에 해당하는 400 kPa크기로 전 구간에서 유지되었으며, 초기 구간

Table 2. TBM Specifications

Item	Value
Excavation Diameter (including overcut) [mm]	7,450
Skin Plate Length [mm]	11,450
Skin Plate Diameter (tail) [mm]	7,400
Segment Outer Diameter [mm]	7,100
Maximum Machine Thrust (approximate) [kN]	47,000
Maximum Torque (approximate) [kNm]	5,000

의 경우 목표압력 대비 최대 160% 수준까지 적용되었다. 한편, Fig. 5(c)는 이론적인 뒤채움 주입체적 대비 실제 주입량의 편차를 도시한 것으로서, 대부분의 구간에서 이론적 체적 이상으로 주입되었으나 일부 지점(Ch.710-730)에서 과소 주입된 것으로 나타났다.

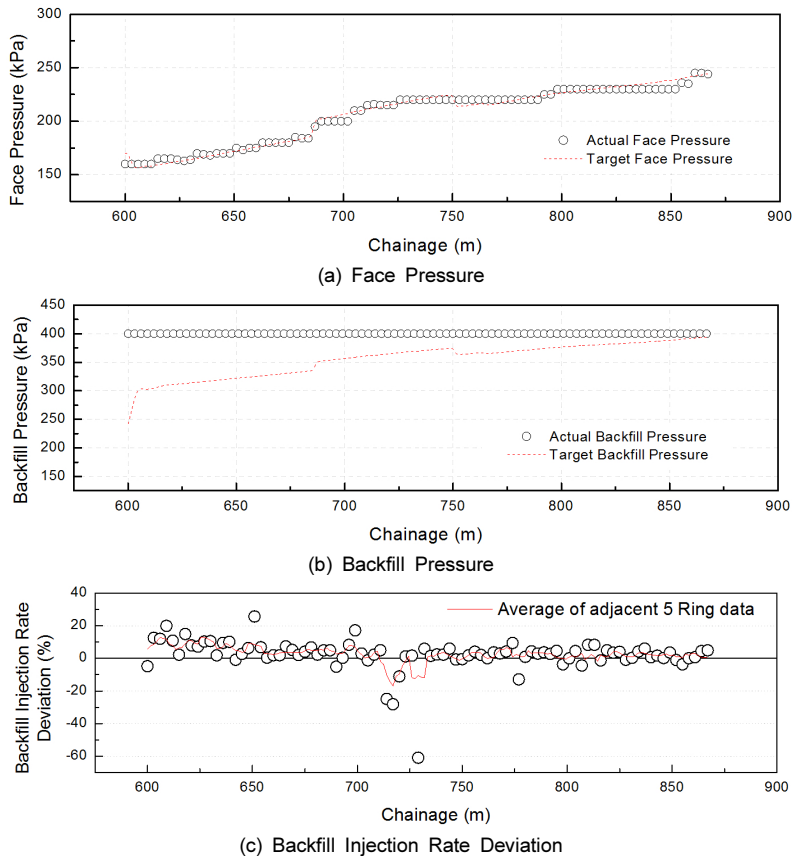


Fig. 5. Monitored TBM machine data

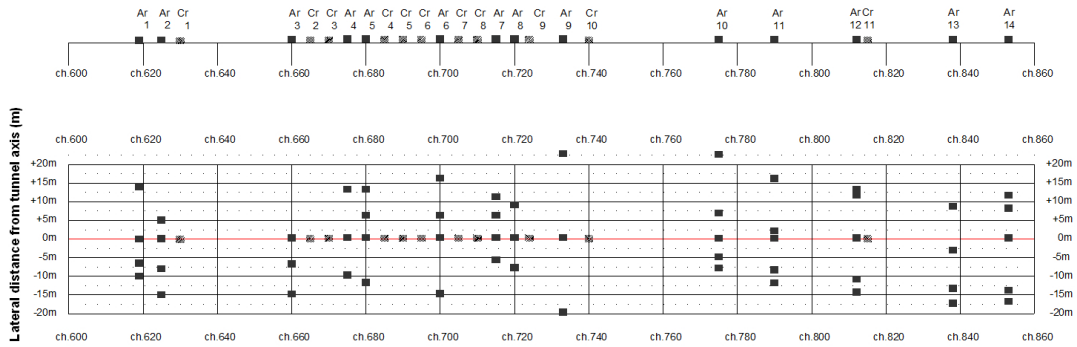


Fig. 6. Ground Settlement Monitoring Array

4.3 지표침하 계측

Fig 6은 지표침하 계측 위치를 나타낸 것이다. Fig 3의 터널 노선에 대하여 14개의 횡방향 계측 배열(Ar01 ~ Ar14)을 설치하였고, 터널 천단 직상부의 지표침하 계측을 위하여 Ar01~Ar12의 천단측점 이외에도 천단측점 11개소(Cr1 ~ Cr11)에서 계측을 수행하였다. 지표침하 계측은 굴진 전후 10일 기간에 대하여 일 2회 수동 방식으로 수행되었다.

5. 계측 결과 및 분석

5.1 침하 계측 결과

터널 굴진 이후 수렴된 침하값을 기준으로 계측된

횡방향 침하 트라프는 Fig. 7과 같다. 최대 침하는 터널 중심축 상부에서 5~13 mm 크기로 발생하였고, 중심축에서 횡방향 거리가 증가함에 따라 점진적으로 감소하는 가우스 분포 곡선의 형태를 확인할 수 있다.

Fig. 8은 터널 천단 직상부에 설치된 계측점에서 측정된 지표침하를 터널 막장면 도달 일자를 기준으로 도시한 것이다. 침하 크기에는 차이가 있으나, 공통적으로 3단계로 지표침하가 발생하고 있음을 보여주고 있다. 첫째로, 막장면 도달 이전 시간대에서는 대부분 지반 융기(+값)가 발생하였고, 막장면 도달 일자에서 다소 침하가 발생하였다. 막장면 통과 이후 설드 본체가 통과하는 1~2일 이내의 기간 동안 급격한 침하 증가가 나타났으며, 그 이후로 뒤택움재의 주입 및 양생 기간에 해당하는 10여일 이상 기간동안 완만

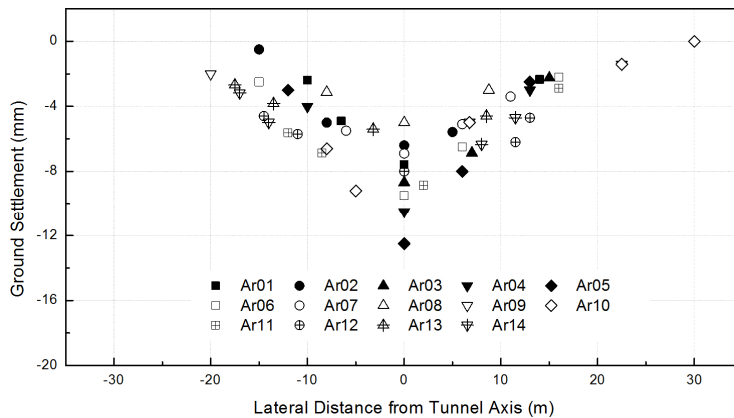


Fig. 7. Measured Lateral Ground Settlement Distribution

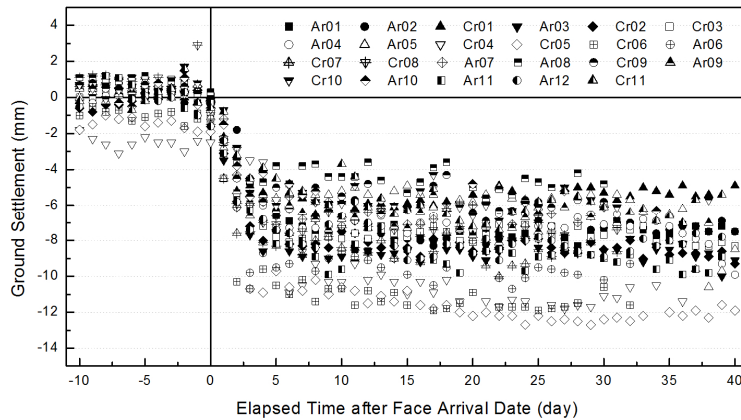


Fig. 8. Variation of Ground Settlement above Tunnel Crown with Time

하게 침하가 증가하였음을 알 수 있다. 이는 Fig. 2에서 언급된 쉴드 TBM 굴진 단계별 지반침하가 동일하게 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 9는 대표적인 두 계측지점(Ar01, Ar04)에서의 침하 계측 결과로, 막장의 도달일자(x축상 0일)와 세그먼트 링 조립일자(수직 점선)를 기준으로 침하 발생 단계를 구분하여 도시하였다. Ar01의 경우, 막장면 도달 이전까지는 지반이 융기되었음을 알 수 있고, 막장면 도달 이후부터 링 조립이 완료 사이의 기간(1일) 동안 3 mm의 침하가 유발되었으며, 링 조립 및 뒤채움 주입 이후 10일 이내에 최대 침하량 7.6 mm에 도달하는 거동이 확인되었다. 한편, Ar04에서는 계측점 위치에 막장면 도달 이후 막장면 슬러리 압력을 100 kPa이하로 저감하였고, 본 굴진 대비로 인한 링 조립까지

30일 가량 가동이 정지되었다. 이에 따라 쉴드부에서 7 mm 가량의 과도한 침하 발생한 후 유휴 기간동안 수렴한 상태로 유지하였으며, 뒤채움 주입 이후에 추가 침하 발생 및 수렴하는 침하 거동을 나타내었다.

계측 오차 영향을 배제하고자 성장곡선(logistic curve)을 이용하여 계측된 침하 데이터에 대한 곡선 맞춤을 수행하였으며, 곡선 맞춤으로부터 얻어진 최종 침하량과 굴진 단계별 침하량은 Fig. 10과 같다. 분석 결과, 전체 침하량 대비 막장면 침하, 쉴드침하, 그리고 후방침하는 각각 평균 6.2%, 30.2%, 63.6%로 나타났으며, 이는 슬러리 TBM의 경우 막장 가압에 의해 막장면 침하가 미미한 반면에 쉴드부 통과 및 뒤채움 그라우팅 주입 이후의 거동이 지표침하의 주원인임을 의미하는 것으로 판단된다.

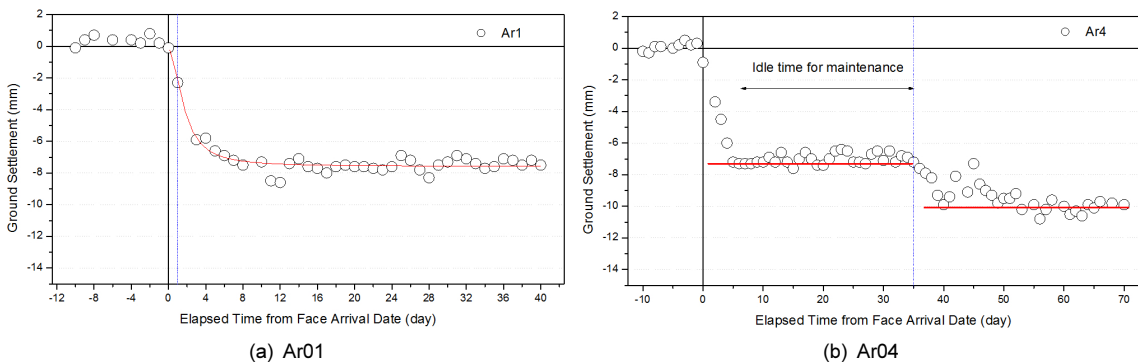


Fig. 9. Typical patterns of ground settlement development

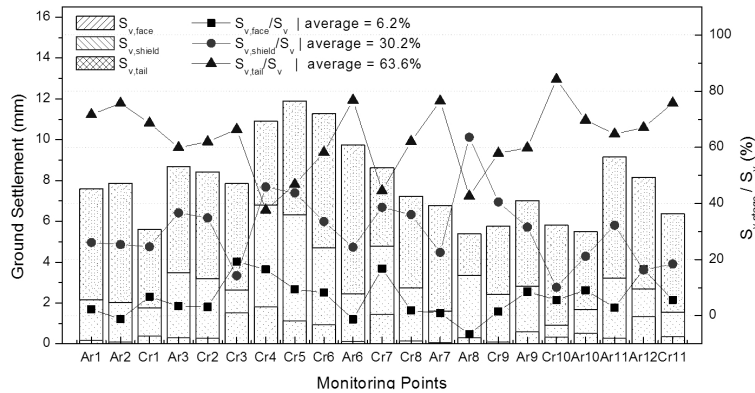


Fig. 10. Monitored ground settlement amount at driving stage

5.2 체적손실 분석

5.2.1 계측 결과로부터 체적손실 산정 결과

횡방향 침하 계측 결과에 대한 가우스 곡선 맞춤을 수행하였으며, 이로부터 산정된 최대 침하, 체적손실 V_L 및 트라프 폭 i 는 Fig. 11과 같다. 터널 굴진에 따른 체적손실은 0.24%~0.63%(평균 0.43%)로 나타났다. 터널 심도에 대한 트라프 폭의 비(i/H)는 0.35~0.67범위로 분포하였으며 평균은 0.52로 분석되었다. 기존 문헌(Forth and Thorley, 1995)에 따르면 대상 지역의 붕괴토 및 CDG지반에서의 쉴드 굴진 시 체적손실은 0.35~0.5%, i/H 는 평균적으로 0.5로 보고되었으며 본 계측 결과는 이와 부합하는 것으로 판단된다.

5.2.2 체적손실 예측 결과와 비교·분석

횡방향 침하 계측 결과로부터 역산정한 총 체적손실과 Loganathan (2011)의 체적손실 산정 모델에 굴진 데이터를 적용하여 예측된 체적손실을 비교하였다. Loganathan (2011)의 모델을 적용한 예측시, 뒤채움재 압축율을 기존 문헌의 상한값(10%)와 하한값(3%)으로 적용하였으며, 계측값과의 비교 결과는 Fig. 12와 같다. 일부 구간을 제외하고, 역산정 결과가 예측 범위 내에 분포하고 있는 것으로 나타났으며, 뒤채움재 압력이 크게 적용된 초기 구간(Ch.600~750)에서는 뒤채움재 압축률 하한에 해당하는 예측값에 가까운 체적손실이, 이후에는 뒤채움재 압축률 상한에 가까운 체적손실이 발생하였음을 확인할 수 있다.

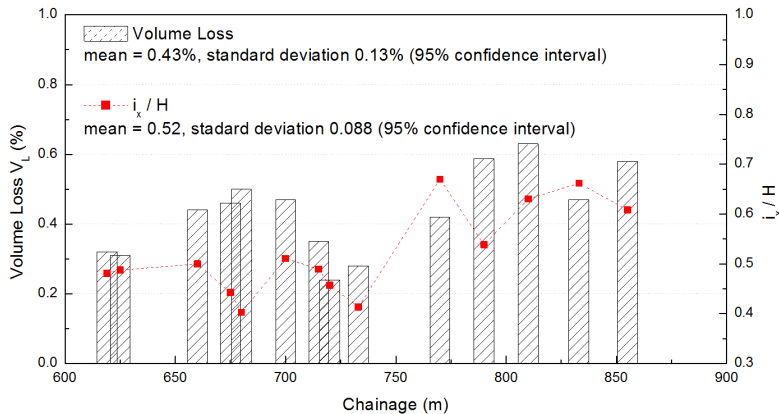


Fig. 11. Volume losses and i/H values estimated from monitoring results

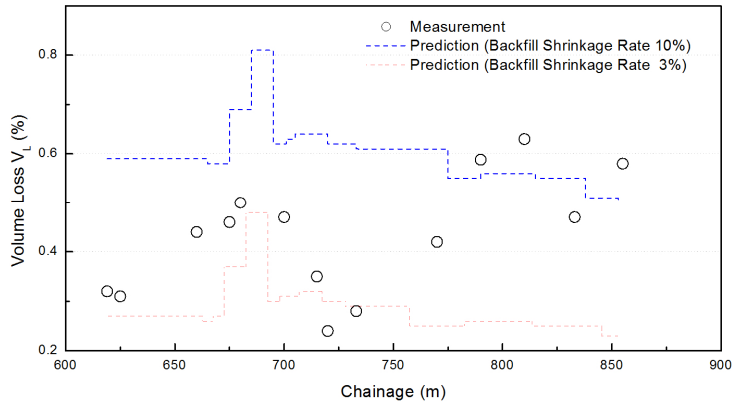
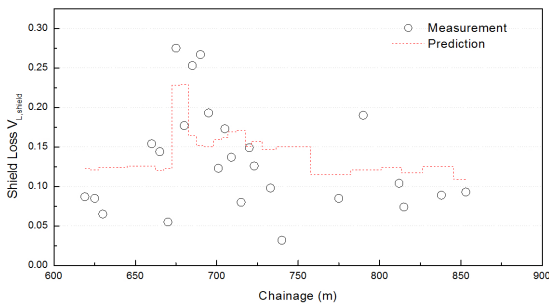


Fig. 12. Comparison of predicted volume losses with measurements

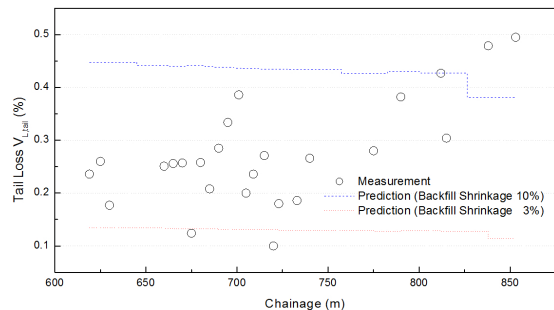
한편, 굴진 단계별 체적손실 산정 결과는 Fig. 13과 같다. 실드손실 비교 결과(Fig. 13(a)), 대부분의 실제 실드손실은 예측값 이내로 나타났으며, 일부 구간(Ch.700-750)에서 상대적으로 작은 실드손실이 발생한 것을 제외하고는 유사한 범위에 분포하였다. 특히, 약 100 kPa 수준으로 막장면 슬러리 압력이 저하된 Ch.675 지점 부근에서는 주변구간에 비해 큰 실드손실(0.26~0.3%)이 발생하였으며, 저감된 슬러리 압력을 고려한 예측 모델 또한 식 (8) 및 식 (9)에 따라 상대적으로 큰 실드손실(0.23%)을 예측하였다. 한편, 테일부 손실 비교 결과는 Fig. 13(b)와 같다. 예측 범위에 분포하는 것으로 나타났으며, 일부 예측 결과를 제외하고는 대부분 상·하한 예측값의 중간 정도의 범위에 분포하는 것을 확인할 수 있다. 실제 굴진 중 지반 및 주입 조건 등의 불확실성이

뒤채움재의 압축율에 미치는 영향을 고려시, 본 분석 결과는 문헌(Ingles, 1972; Lagerblad et al., 2013)에서 언급된 압축율 범위가 실제 굴진 중 테일부 손실 거동을 합리적으로 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

Fig. 14는 체적손실 예측값 대비 실제 실드/테일부 손실 값의 비를 나타낸 것이다. 실드손실의 경우 장비 유희 영향으로 인한 체적손실이 큰 구간을 제외할 시 예측값의 1.3배 이내로 평균적으로 예측값의 0.9배(표준편차 0.38)로 분석되었으며, 테일부 손실의 경우 그라우트 재료의 압축율 상한(10%)을 가정한 예측값 대비 평균적으로 0.62배(표준편차 0.27)로 나타났다. 이러한 결과는 실드 TBM 굴진 중 실제 발생하는 체적손실은 막장·실드·테일부 손실 예측값의 단순 합과는 차이가 있음을 의미하며, 이는 연속적인 굴진 과정 중 각 인자 별 체적손실이 예측시 가정한 조건과



(a) Shield Loss



(b) Tail Loss

Fig. 13. Comparisons of monitored and predicted shield and tail losses

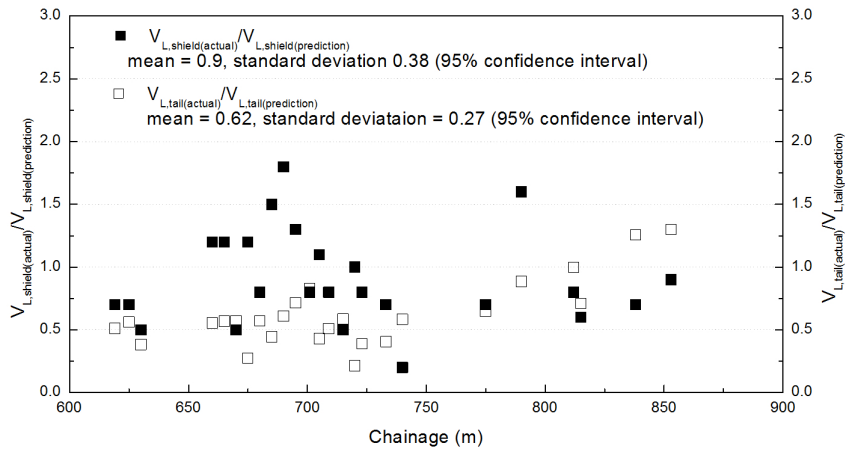


Fig. 14. Relative magnitude of observed volume losses compared to prediction

다른 조건에서 발생하였거나, 독립적으로 발생하는 것이 아닌 상호 영향을 미치며 발생하였기 때문으로 이해될 수 있다. 그러나, 굴진 중 체적손실 인자별 상호관계를 정량적으로 도출하는 것은 쉽지 않을 것으로 사료되며, 다수의 굴진 사례가 확보된 경우 경험적으로 상호 연관성 분석이 수행되는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

이와 관련하여 본 논문에서는 식 (11)과 같이 체적손실 인자별 경험 계수를 고려한 선형적인 관계를 제안코자 한다. 본 슬러리 TBM 터널의 경우, 막장손실이 미미하므로 $\alpha = 0$ 으로 고려될 수 있으며, Fig. 14로부터 쉴드손실 보정계수 $\beta = 0.9 \pm 0.38$, 그리고 테일부 손실 보정계수 $\gamma = 0.62 \pm 0.27$ 로 산정될 수 있다. 유사 지반·터널 조건에 대한 굴진데이터 및 지표침하 예측 결과가 축적될 경우, 보정 계수의 정확도가 향상될 수 있을 것으로 사료되며, 동일 구간 내 단선 병렬 터널시 선시공되는 터널에 대한 분석으로 후시공 터널의 지표침하 및 굴진 관리 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

$$V_L = \alpha V_{L,face} + \beta V_{L,shield} + \gamma V_{L,tail} \quad (11)$$

6. 결론

본 논문에서는 차별풍화가 진행된 화강암 지반을 통과하는 슬러리 TBM 굴진 중 지표침하 거동 분석과 체적손실 산정에 대한 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 터널 굴진 이후 수렴된 횡방향 침하 예측 결과는 가우스 분포 곡선 형태와 부합하였으며, 지표침하 트라프로부터 산정된 체적손실 V_L 및 번곡점까지의 거리 l 는 기존에 문헌에서 보고된 범위와 유사한 것으로 확인되었다. 본 논문에서 다른 슬러리 TBM의 굴진 단계별 침하 발생 비율은 선행침하, 쉴드침하, 그리고 테일부 침하 각각 평균 6.2%, 30.2%, 63.6%로 나타났으며, 이는 슬러리 TBM의 경우 쉴드부 통과 및 뒤채움 그라우팅의 거동이 침하 발생의 주요소임을 의미한다.
2. 횡방향 침하 예측 결과로부터 역산정한 총 체적손실과 굴진 데이터를 이용하여 Loganathan (2011)의 모델로 예측된 체적손실을 비교하였다. 비교 결과, 역산정 결과가 모델이 예측한 범위 내에 분포하고 있는 것으로 나타났다. 역산정된 쉴드손실 값은 굴진데이터로부터 예측된 값 이내로 나타났으며, 테일부 손실의 경우 Loganathan (2011)의

- 예측모델에서 고려된 그라우트 수축율 10%는 실제 발생 값의 상한에 해당하는 것으로 나타났으며, 문헌에서 보고된 수축율 하한값(3%)은 역산정된 테일부 손실의 하한에 해당하는 것으로 파악되었다.
3. 본 사례연구에서는 실드 TBM 굴진 중 실제 체적손실 발생량은 예측을 통해 얻어진 막장·실드·테일부 손실 예측값의 단순합과는 차이를 나타냈다. 이에 대하여 본 연구에서는 각 요인별 체적손실을 산정한 후, 현장 계측 결과 분석과 비교하여 체적손실 인자별 보정 계수를 적용하여 선형적인 합을 구하는 방안을 제안하였으며 본 사례연구의 경우 막장·실드·테일부 보정계수는 각각 0, 0.9, 0.62로 나타났다. 이와 같은 경험적인 접근은 단선 병렬 터널과 같이 동일 구간 내 반복적인 시공이 이루어질 경우 선시공되는 터널에 대한 분석으로, 후 시공 터널의 지표침하 및 굴진 관리 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발, 15SCIP-B066321-03)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Bezuijen, A., Bakker, K.J. (2007), "Bentonite and grout flow around a TBM", Proceedings of WTC 2007, Prague.
2. BouBou, R., Emeriault, F., Kastner, R. (2008), "Correlation between TBM parameters and ground surface settlements - Neural network method", ISSMGE TC28, Hungary.
3. Fargnoli, V., Boldini, D., Amorosi, A. (2013), "TBM tunnelling-induced settlements in coarse-grained soils: The case of the new Milan underground line 5", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 38, pp. 336-347.
4. FHWA. (2009), "Road Tunnel Manual (FHWA-NHI-09-010)".
5. Forth, R.A., Thorley, C.B.B. (1995), "Ground and building settlement due to tunnelling in Hong Kong", Land Subsidence, No. 234, pp. 149-160.
6. Ingles, O.G. (1972), "Soil Stabilization, Butterworths", Sydney, Australia.
7. Jones, B.D. (2010), "Low-volume-loss tunnelling for London ring main extension", Geotechnical Engineering, Vol. 163, pp. 167-185
8. Lagerblad, B., Fjallberg, L. Vogt, C. (2010), "Shrinkage and durability of shotcrete", Proceedings of shotcrete elements of a system, ED: Bernard, E.S., 2010, Taylor & Francis Group, London, U.K., pp. 173-180.
9. Lee, K.M., Rowe, R.K., Lo, K.Y. (1992), "Subsidence owing to tunneling. I. estimating the gap parameter", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 29, pp. 929-940.
10. Land Transport Authority. (2013), "Particular Specification, Thomson Line Contract T212". Singapore.
11. Loganathan N. (2011), "An innovative method for assessing tunnelling-induced risks to adjacent structures", Parsons Brinckerhoff Inc., New York, United States.
12. Mair, R.J., Taylor, R.N. (1997), "Bored tunneling in the urban environment", In proceedings of 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Germany.
13. MTR Corporation Ltd. (2011), "Consultancy Agreement No. C1105 - Shatin to Central Line", Hong Kong.
14. Peck, R.B. (1969), "Deep excavations and tunneling in soft ground, State-of-art report", In Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State-of-the-Art Volume, Mexico City, Mexico, pp. 225-290.
15. Schmidt, B. (1969), "Settlements and ground movements associated with tunneling in soil",

- PhD thesis, University of Illinois, Urbana, United States.
16. Suwansawat, S. (2002), "Earth pressure balance (EPB) shield tunneling in bangkok: ground response and prediction of surface settlements using artificial neural networks", Doctoral Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, United States.
 17. Wongsaroj, J., Borghi, E.X., Soga, K., Mair, R.J., Sugiyama, T., Hagiwara, T., Bowers, K.H. (2013), "Effect of TBM driving parameters on ground surface movements: channel tunnel rail link contract 220", In Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground: Proceedings of the 5th International Symposium TC28. Amsterdam, the Netherlands, Vol. 99, pp. 15-17.