

# 수치해석과 현장 계측값 비교를 통한 Shield TBM 지표침하 영향요소 검토

## A Study on Key Factors of Ground Settlement Due to Shield TBM Excavation using Numerical Analysis and Field Measurement Comparison

전기찬<sup>1\*</sup>, 김동현<sup>2</sup>

Gychan Jun<sup>1\*</sup>, Donghyun Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Member, Senior Managing Director, KOREA Engineering & Construction Co., Ltd., Research Institute Dept.

<sup>2</sup>Member, Vice President, KOREA Engineering & Construction Co., Ltd., Research Institute Dept.

### ABSTRACT

This study estimates the degree of influence of factors influencing ground surface settlement during tunnel excavation using Shield tunneling through 3D FE-analyses. Numerical analysis was carried out by considering face pressure, skinplate pressure, excavation length, soil model, element size and soil material properties. Also, Actually constructed shield TBM comparative analysis was conducted by compared with Volume loss model, Pressure model and field measurement data. Skinplate pressure and soil model were the most influential factors, and the analysis results were similar to field measurements when the appropriate skinplate pressure was applied according to the passing stratum.

### 요 지

Shield TBM  
· , Skinplate , , , ,  
· Skinplate Shield TBM  
가 , Skinplate

**Keywords** : Shield-TBM, 3-dimension numerical analysis, Surface settlement, Field measurement data, Ground settlement

## 1. 서 론

최근 세계적으로 인구증가와 도시화에 따라 부지확보, 교통난해 해결 및 기반산업시설의 지하화에 따른 지하공간 개발에 대한 요구가 증가하고 있다. 이에 따라 구조물 근접 굴착, 강이나 하천 하부를 통과하는 하저터널, 국가와 국가 혹은 섬과 본토를 연결하는 해저터널, 초연약지반을 통과하는 터널굴착 등 특수한 조건에서의 터널시공에 대한 필요성이 대두되고 있으며 적용이 불가피하다. 이러한 조건에서

지하구조물 자체뿐만 아니라 인접 구조물에 대한 안정성을 확보할 수 있는 Shield TBM공법이 주목받고 있다. Shield TBM공법은 굴착과 동시에 후방에서 바로 세그먼트를 조립하고 그라우트를 주입하는 연속공정으로 발파로 굴착하는 터널보다 공기를 단축시킬 수 있으며, 굴진시 막장압과 뒷채움압 제어를 통하여 굴착면 안정성을 선확보한 상태에서 작업한다는 장점이 있다. 최근 도로, 철도, 전력구, 통신구, 상하수도 터널 등 국내에서도 Shield TBM공법의 적용이 증가함에 따라 학계에서도 활발하게 연구가 되고 있는 실정이나 주로 전력구와 같은 소규모 위주로 대단면에 대한 시공사례가 부족하고 설계분야에서도 명확한 설계방법이 정립되지 못하고 있는 실정이다. 특히 도심지 설계에서 중

Received 10 Mar. 2017, Revised 22 Mar. 2017, Accepted 24 Mar. 2017

\*Corresponding author

Tel: +82-31-699-5544; Fax: +82-31-790-3040

E-mail address: gychan2005@kecgroup.kr (G. Jun)

Table 1. Analysis method

Division	Contraction model	Volume loss model	Pressure model
Key map			
Analysis method	Method of applying contraction pressure to Shields and Segments	Method of applying volume loss calculated from tail void, soil property and face pressure.	Method of applying pressure boundary condition regardless of the type of shield machine.

요한 지표침하 예측방안이 기존 수치해석 방법 및 문헌자료를 이용하고 있어 설계자에 따라 결과가 상당한 차이를 보이고 있는 실정이다. 본 논문에서는 3차원 수치해석을 이용하여 Shield TBM공법을 적용한 터널굴착 해석시 지표침하에 영향을 주는 요소에 대한 영향 평가를 실시하고 다양한 조건 및 해석방법에 대하여 수치해석을 수행하여 지표침하에 미치는 영향정도 및 계측자료 분석을 통해 적정해석방법에 대한 검토를 수행하고자 하였다(Cho, 2008).

## 2. 해석 영향요소 및 해석방법

### 2.1 해석 영향요소

지표침하에 영향을 미치는 요소들에 대한 검토를 수행하기 위해 막장압, Skinplate 주면압, 굴진장, Soil model, 요소망크기, 통과지반물성을 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 막장압은 160~300kPa, Skinplate 주면압은 125~250kPa, 굴진장은 1.5~4.5m, 요소망크기는 very coarse~very fine으로 변화시켜 가며 해석결과에 가장 큰 영향을 주는 요소에 대한 검토를 수행하였다. Soil model은 일반적으로 쓰이는 탄소성 변형을 표현하는 모델로 Mohr-Coulomb 파괴기준 외에도 Hardening Soil(HS), Hardening Soil small (HS-small) 모델을 적용하여 해석결과를 분석하였다(Jun & Kim, 2015).

### 2.2 해석방법

Shield TBM터널 해석에서 일반적으로 쓰이는 변위제어 모델(Volume loss model)과 응력제어 모델(Pressure model)을 Plaxis-3D를 이용하여 해석을 수행하였으며, 해

석방법은 Table 1과 같다(LIM KEN CHAI, 2003).

## 3. 영향인자별 지표침하 영향 정도 비교분석

### 3.1 해석 개요

영향인자별 지표침하에 미치는 영향 정도를 비교하기 위해 네덜란드 최초의 하저터널인 Second heinenoord tunnel을 기본 연구배경으로 선정하였다. 해석영역은 터널 굴진방향 120m, 폭 40m, 높이 27.5m, 터널 직경 8.3m, 토 피고 15m로 모델링 하였고, 경계조건 영향을 고려하여 초기굴진 20m 이후 부터의 결과를 정리하였다.

### 3.2 해석 적용 물성치

Second heinenoord 터널 통과구간인 Oude Maas강 하부 지질현황은 Fig. 1과 같이 층적층과 홍적층이 분포하고 있는 것으로 조사되었으며, 각 층은 사질토, 점성토 및 이탄층의 연약지반으로 구성되어 있으며 해석 적용 물성은 Table 2, Table 3과 같다(Sven Movller, 2006).

여기서,  $\nu_{ur}$  : Poisson's ratio for unloading/reloading  
 $E_{ocd}^{ref}$  : Tangent stiffness for primary oedometer loading  
 $E_{50}^{ref}$  : Secant stiffness in standard drained triaxial test  
 $E_{ur}^{ref}$  : Unloading/reloading stiffness  
 $G_0^{ref}$  : Reference value of the shear modulus

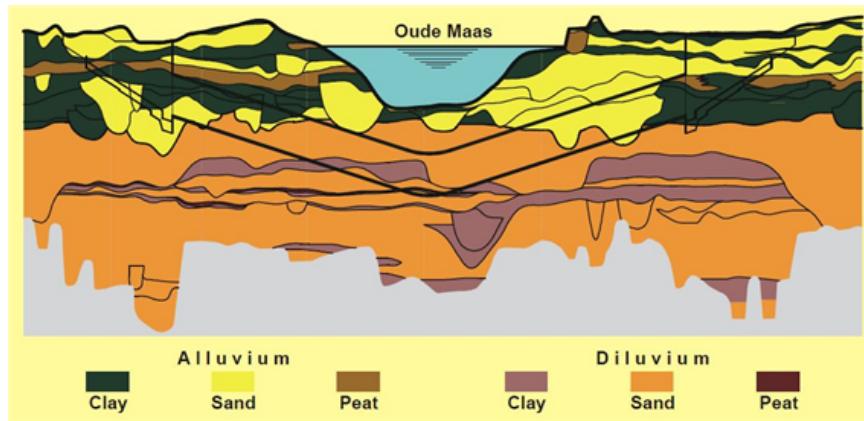


Fig. 1. Second Heineoord tunnel geologic strata

Table 2. Heineoord soil properties (Mohr–Coulomb, Sand / Clay)

layer	$\gamma_{saturated}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\nu$ [-]	$E_{oed}$ [MPa]	$c'$ [kPa]	$\phi'$ [°]	$K_0$ [-]
1	17.2	0.34	8	3	27	0.58
2	20	0.30 / 0.32	40 / 48	0.01 / 7	35 / 31	0.47 / 0.55
3	20	0.30 / 0.30	120 / 40	0.01 / 0.01	35 / 35	0.47 / 0.47
4	20	0.32 / 0.30	48 / 120	7 / 0.01	31 / 35	0.55 / 0.47

Table 3. Heineoord soil properties (HS & HS–small, Sand / Clay)

layer	$\nu_{ur}$ [-]	$E_{oed}^{ref}$ [MPa]	$E_{50}^{ref}$ [MPa]	$E_{ur}^{ref}$ [MPa]	$G_0^{ref}$ [MPa]	$\gamma_{0.7}$ [%]	m [-]	OCR 1
1	0.2	14	14	42	52	5•10 <sup>-4</sup>	0.5	1
2	0.2	35 / 7	35 / 12	105 / 35	175 / 88	5•10 <sup>-4</sup>	0.5 / 0.9	1
3	0.2	35 / 35	35 / 35	105 / 105	175 / 175	5•10 <sup>-4</sup>	0.5 / 0.5	1
4	0.2	7 / 35	12 / 35	35 / 105	88 / 175	5•10 <sup>-4</sup>	0.9 / 0.5	1

at small stretches

$\gamma_{0.7}$  : Reference value of shear strain with approximately 72.2% reduction of the shear modulus

m : Power for stress-level dependency of stiffness

### 3.3 해석 적용 Case

시공현장에서는 막장압 230kPa, 뒷채움 그라우팅압 125kPa로 계획되었으며, 굴진장은 1.5m로 시공되었다. 실제 현장조건 외에 Table 4와 같이 해석조건을 추가하여 수치해석을 수행하였다.

### 3.4 해석결과

#### 3.4.1 막장압 영향검토

막장압에 의한 지표침하하는 막장압이 클 경우 막장면 전방에 융기가 발생하고 후방에서는 지표침하가 미소하게

증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 막장압이 증가함에 따라 전방에 발생한 융기가 막장면 후방의 지표침하에 영향을 미치는 것으로 예상된다. 특히 Mohr-Coulomb 모델 적용시 지반이 융기되는 현상이 두드러지게 나타났으며, Clay층에 Hardening-soil-small 모델을 적용한 경우는 막장압에 따라 변위차이가 크게 발생하였으므로 적용시 주의가 요망된다(Jun & Kim, 2016).

#### 3.4.2 Skinplate 주면압 영향검토

Skinplate 주면압에 의한 영향은 막장압보다 훨씬 지표침하에 영향을 많이 주는 것으로 나타났으며, 해석적용모델과 더불어 지표침하에 가장 많은 영향을 주는 것으로 나타났다. Sand층을 통과하는 경우 Skinplate 주면압이 낮을 경우 지표침하가 크게 발생하지만 일정범위를 넘어서면 변위차이가 크지 않은 것으로 나타났다. Clay층을 통과하는 경우 Skinplate 주면압이 클수록 침하는 감소하지만 Skinplate 주면압이 크면 지반융기가 많이 발생하였다. Skinplate 주면압과 통과지층에 따라 지표침하 발생경향이 크게 차이가 나

Table 4. Analysis Cases

Analysis Case		Face pressure	Skinplate pressure	Advance length	Soil model	Element size
Face pressure ① (Sand / Clay)	Case18	230kPa	125kPa	1.5m	Hardening-Soil	medium
	Case22	160kPa				
	Case23	300kPa				
Face pressure ② (Sand / Clay)	Case19	230kPa	125kPa	1.5m	Hardening-Soil-small	medium
	Case24	160kPa				
	Case25	300kPa				
Face pressure ③ (Sand / Clay)	Case39	230kPa	125kPa	1.5m	Mohr-Coulomb	very fine
	Case59	160kPa				
	Case60	300kPa				
Skinplate pressure ① (Sand / Clay)	Case11	230kPa	125kPa	1.5m	Mohr-Coulomb	medium
	Case12		180kPa			
	Case13		250kPa			
Skinplate pressure ② (Sand / Clay)	Case14	160kPa	125kPa	1.5m	Mohr-Coulomb	medium
	Case15		180kPa			
	Case16		250kPa			
Skinplate pressure ③ (Sand / Clay)	Case39	230kPa	125kPa	1.5m	Hardening-Soil-small	very fine
	Case57		180kPa			
	Case58		250kPa			
Advance length ① (Sand / Clay)	Case11	230kPa	125kPa	1.5m	Mohr-Coulomb	medium
	Case20			3.0m		
	Case21			4.5m		
Advance length ② (Sand / Clay)	Case18	230kPa	125kPa	1.5m	Hardening-Soil	medium
	Case26			3.0m		
	Case27			4.5m		
Advance length ③ (Sand / Clay)	Case19	230kPa	125kPa	1.5m	Hardening-Soil-small	medium
	Case28			3.0m		
	Case29			4.5m		
Soil model ① (Sand / Clay)	Case11	230kPa	125kPa	1.5m	Mohr-Coulomb	medium
	Case18				Hardening-Soil	
	Case19				Hardening-Soil-small	
Soil model ② (Sand / Clay)	Case14	160kPa	125kPa	1.5m	Mohr-Coulomb	medium
	Case22				Hardening-Soil	
	Case24				Hardening-Soil-small	
Soil model ③ (Sand / Clay)	Case39	230kPa	125kPa	1.5m	Mohr-Coulomb	very fine
	Case45				Hardening-Soil	
	Case51				Hardening-Soil-small	
Element size ① (Sand / Clay)	Case11	230kPa	125kPa	1.5m	Mohr-Coulomb	medium
	Case39					very fine
	Case40					very coarse
Element size ② (Sand / Clay)	Case18	230kPa	125kPa	1.5m	Hardening-Soil	medium
	Case45					very fine
	Case46					very coarse
Element size ③ (Sand / Clay)	Case19	230kPa	125kPa	1.5m	Hardening-Soil-small	medium
	Case51					very fine
	Case52					very coarse

Table 5. Face pressure Case results

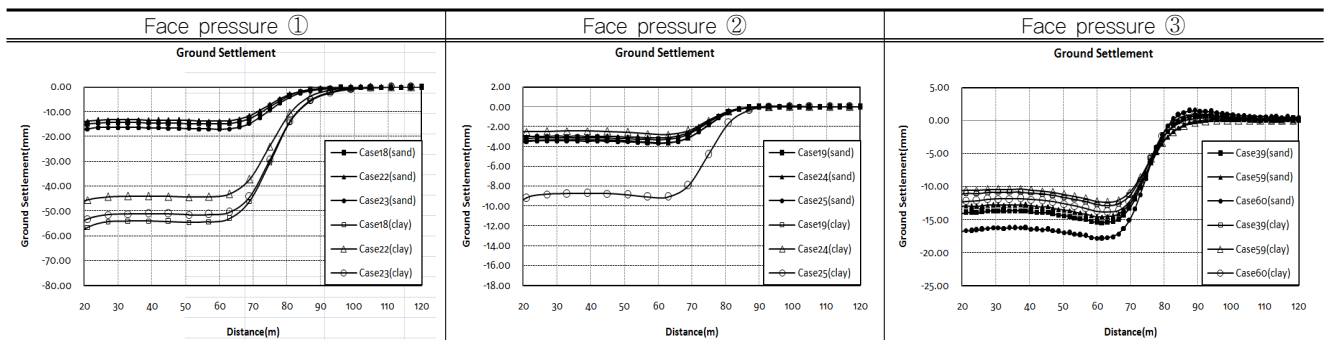


Table 6. Skinplate Pressure Case results

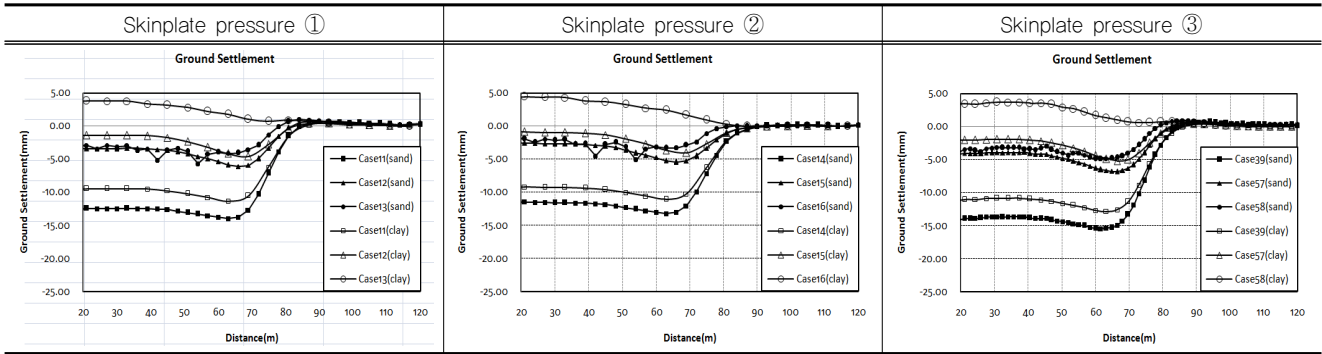


Table 7. Advance length Case results

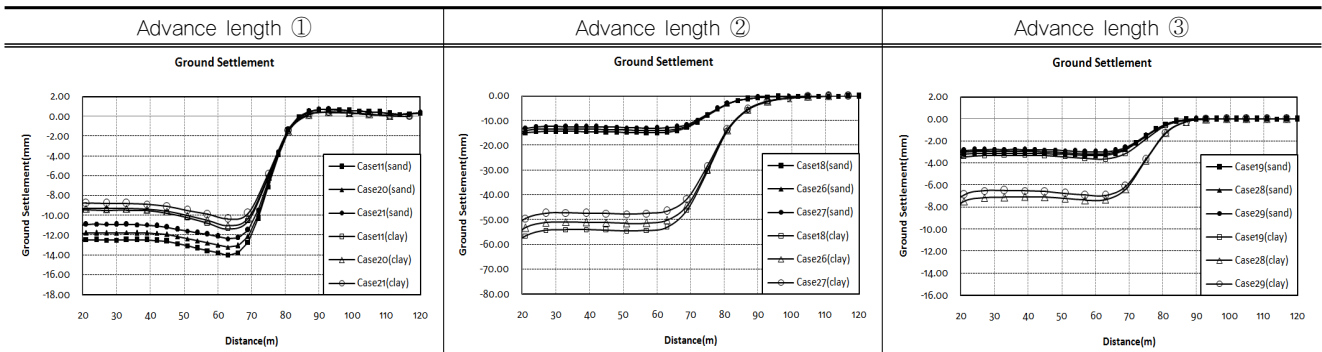
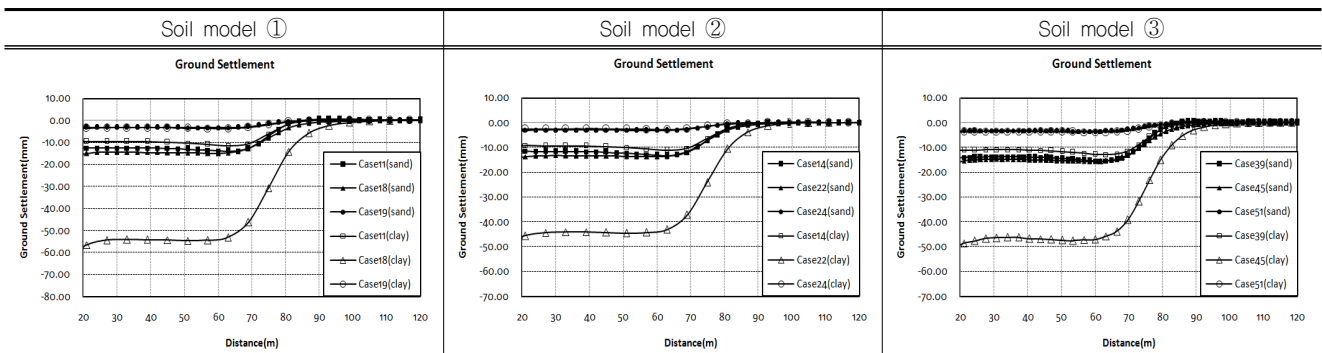


Table 8. Soil model Case results



므로 적절한 Skinplate 주변압과 정확한 지층조건을 적용하여 해석에 적용하여야 할 것으로 판단된다.

경우에는 해석에 적절한 굴진장을 검토 후 적용하여야 할 것으로 판단된다.

### 3.4.3 굴진장 영향검토

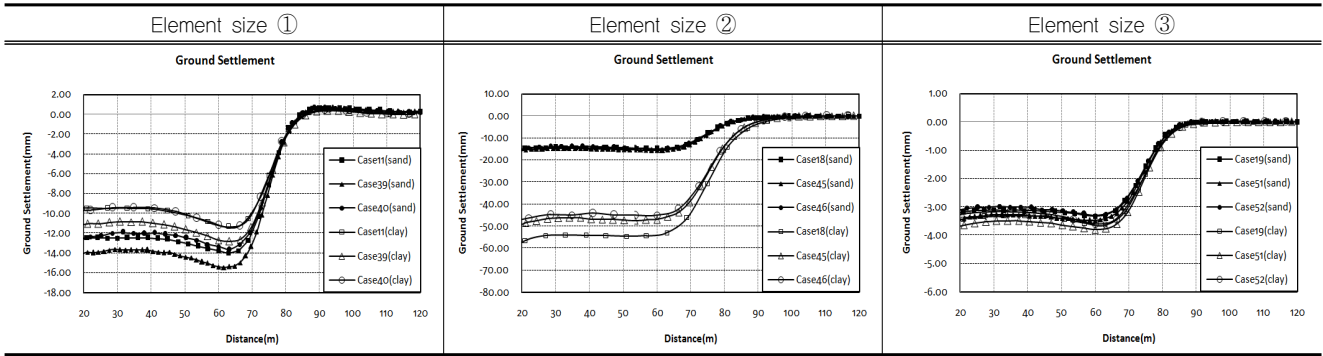
해석결과 Sand / Clay층 모두 굴진장에 의한 영향은 미미한 것으로 나타났다. 다만 Clay층 통과 Hardening-soil-small모델의 경우 굴진장이 1.5m가 넘어가는 경우 변위가 다소 크게 발생하는 경향을 나타냈으며, 3.0m와 4.5m에서는 비슷한 경향을 나타냈다. 해석 적용시 굴진장은 해석 결과에 크게 영향을 주지 않으므로 초기나 통과 후에는 굴진장을 늘려서 적용하여도 큰 문제가 없을 것으로 판단되나 Clay층 통과시 Hardening-soil-small모델을 적용하는

### 3.4.4 Soil model 영향검토

해석결과 Soil model에 의한 영향은 적용 Skinplate 주변압과 더불어 지표침하에 가장 많은 영향을 주는 것으로 나타났으며 통과지층에 따라 상당한 차이를 보이는 것으로 나타났다. Sand층 통과시에는 Hardening-Soil-small을 적용한 경우가 다른 Soil-model을 적용한 경우보다 변위가 작게 발생하였으나 Clay층 통과시에는 Hardening-Soil을 적용한 경우가 다른 Soil-model을 적용한 경우보다 변위가 크게 발생하였다. 통과지층 및 Soil model에 따라 결



Table 9. Element size Case results



과값 차이가 상당하므로 통과지층에 적절한 Soil model을 적용하여야 할 것으로 판단된다.

### 3.4.5 요소망 영향검토

해석결과 Sand층과 Clay층 모두 요소망 크기에 따른 영향은 미미한 것으로 나타났다. 다만 Clay층의 경우 전반적으로 Sand층에 비해 요소망 크기에 따른 영향이 상대적으로 크게 나타났다. 요소망 크기에 따라 해석시간 및 파일 용량은 상당한 차이가 있으므로 요소망 선정시 해석목적, 기하형상, 물성을 고려하여 적용함이 타당한 것으로 판단된다.

셸드TBM 수치해석시 가장 큰 영향을 미치는 요소는 Skinplate 주면압과 Soil model로 나타났다. 따라서 막장 압보다 Skinplate 주면압 관리가 중요 사항임이 예상되고 해석 적용시 적정 Skinplate 주면압과 Soil model 적용이 필수라 판단된다.

Hardening-soil 모델과 Hardening-Soil-small 모델의 경우 Mohr-coulomb 모델보다 정확하게 지반 강성을 정의할 수 있으며 지반의 dilatancy 반영, 항복면이 소성변형까지 확장할 수 있다는 장점이 있지만 Mohr-coulomb 모델에 비해 많은 입력물성치가 필요하며 이를 산정하는데 많은

비용이 소요된다는 단점이 있다. Mohr-coulomb 모델의 경우 비교적 단순하다는 단점은 있지만 각 층마다 일정한 평균 강성으로 인해 계산이 매우 빠르며 물성치 산정에 큰 비용이 소요되지 않는다는 장점이 있다. 현장에서 손쉽게 물성치를 구할 수 있고, 실무에서 많이 사용되는 Mohr-Coulomb 모델을 중심으로 연구를 수행하는 것이 타당하다고 판단된다.

## 4. 수치해석을 통한 현장 계측값 비교분석

### 4.1 해석 개요

영향인자별 지표침하검토 결과를 반영하여 3차원 수치 해석을 수행하여 현장 계측값과 비교분석을 실시하였다. 현장 계측값은 홍콩 OO지하철 건설공사 현장에서 계측된 결과를 적용하였으며, 3차원 수치해석 영역은 터널굴진방향 100m, 폭 35m, 높이 35m, 터널 직경 7.45m, 토피고는 14.68m로 모델링 하였다. Skinplate 주면압과 막장압은 그라우트재의 단위중량을 고려하여 깊이에 따라 적용하였다. 잭 추진력은 최종 세그먼트 라이닝 후면에 적용하였다. 해석에 적용된 단면은 Fig. 2와 같다.

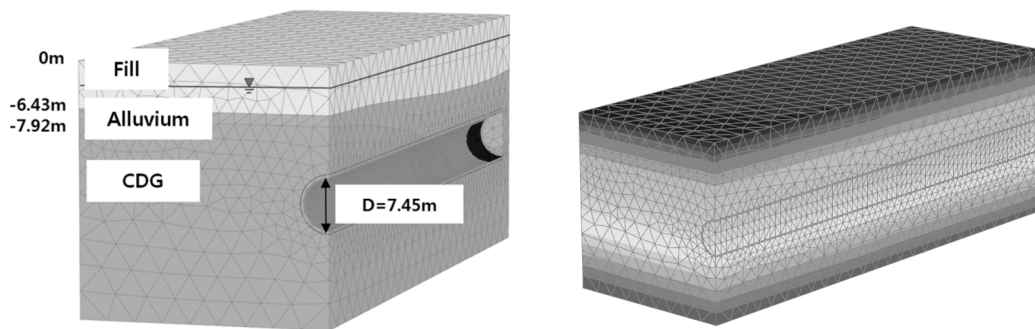


Fig. 2. Analysis modeling

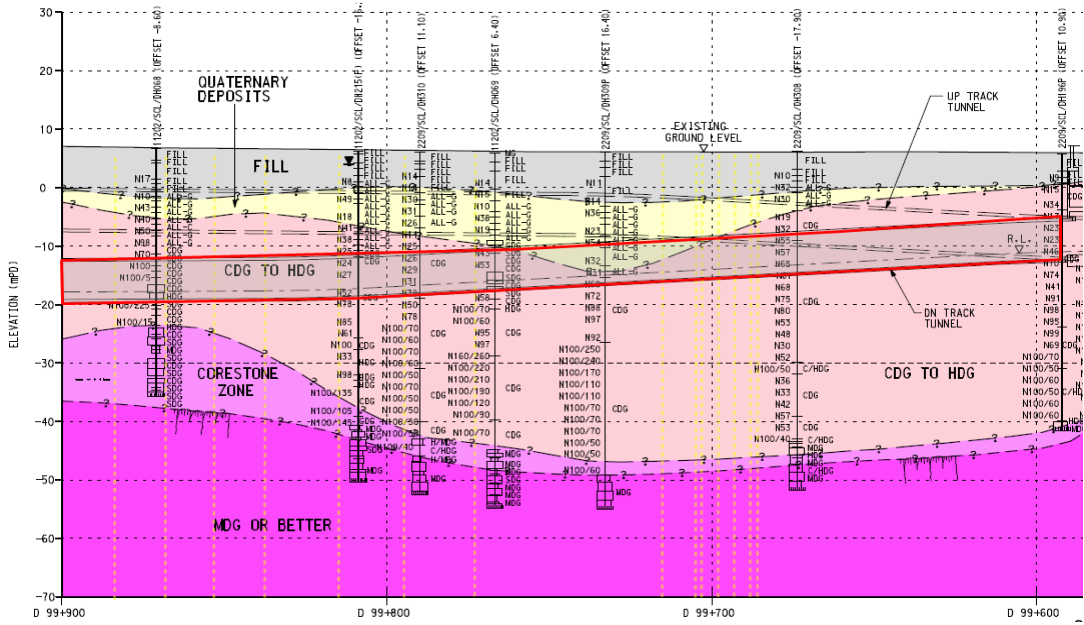


Fig. 3. Hongkong OO subway tunnel geologic strata

Table 10. Hongkong OO subway tunnel soil properties

layer	$\gamma_{saturated}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\nu$ [-]	$E$ [MPa]	$c'$ [kPa]	$\phi'$ [°]
Fill	19	0.25	15	1	35
Alluvium	19	0.25	43,5	1	35
CDG	19	0.25	46,5	8	38

Table 11. Analysis Cases

Analysis Case	Analysis method	
Case 1	Volume loss model	10.5m volume loss
Case 2	Pressure model	10.5m grout pressure
Case 3		6.0m face pressure, 4.5m grout pressure
Case 4		9.0m face pressure, 1.5m grout pressure
Case 5		10.5m face pressure

## 4.2 해석 적용 물성치

해석 적용 물성치는 현장 시추결과를 반영하였으며, 시추 결과 및 지질현황은 Fig. 3과 같다. Shield TBM터널의 주요 통과 지층은 완전~부분 풍화 지반으로, 해석 적용 물성은 Table 10과 같다.

지반의 Volume loss 값은 미국 FHWA(2009)의 Alluvium 지반의 Volume loss 0.45%, CDG 지반의 Volume Loss 0.3(soil), 1.0(mixed)를 참고하여 0.65%를 적용하였다(Chang, 2015).

## 4.3 해석 적용 Case

시공현장에서는 막장압은 164~244kPa, 뒷채움 그라우

팅압은 400kPa로 계획되었으며, 세그먼트는 1.5m로 시공되었다. Skinplate는 총 7span으로 1span은 1.5m로 모델링되었으며, Volume loss model 외에 해석결과에 가장 큰 영향을 미치는 Skinplate 주면압 변화 Case(2,5)와 일부 구간 주면압 차등적용 Case(3,4)를 추가시켜 Table 11과 같이 수치해석을 수행하였다.

## 4.4 해석결과

### 4.4.1 Volume loss model 침하량 결과

Volume loss model을 적용한 터널해석에서 주요영향인자는 지반의 Volume loss 값이며 CDG 지반 0.6%, Alluvium 지반 0.45%의 수축 값을 적용하여 해석하였다. Volume

Table 12. Analysis results of volume loss model

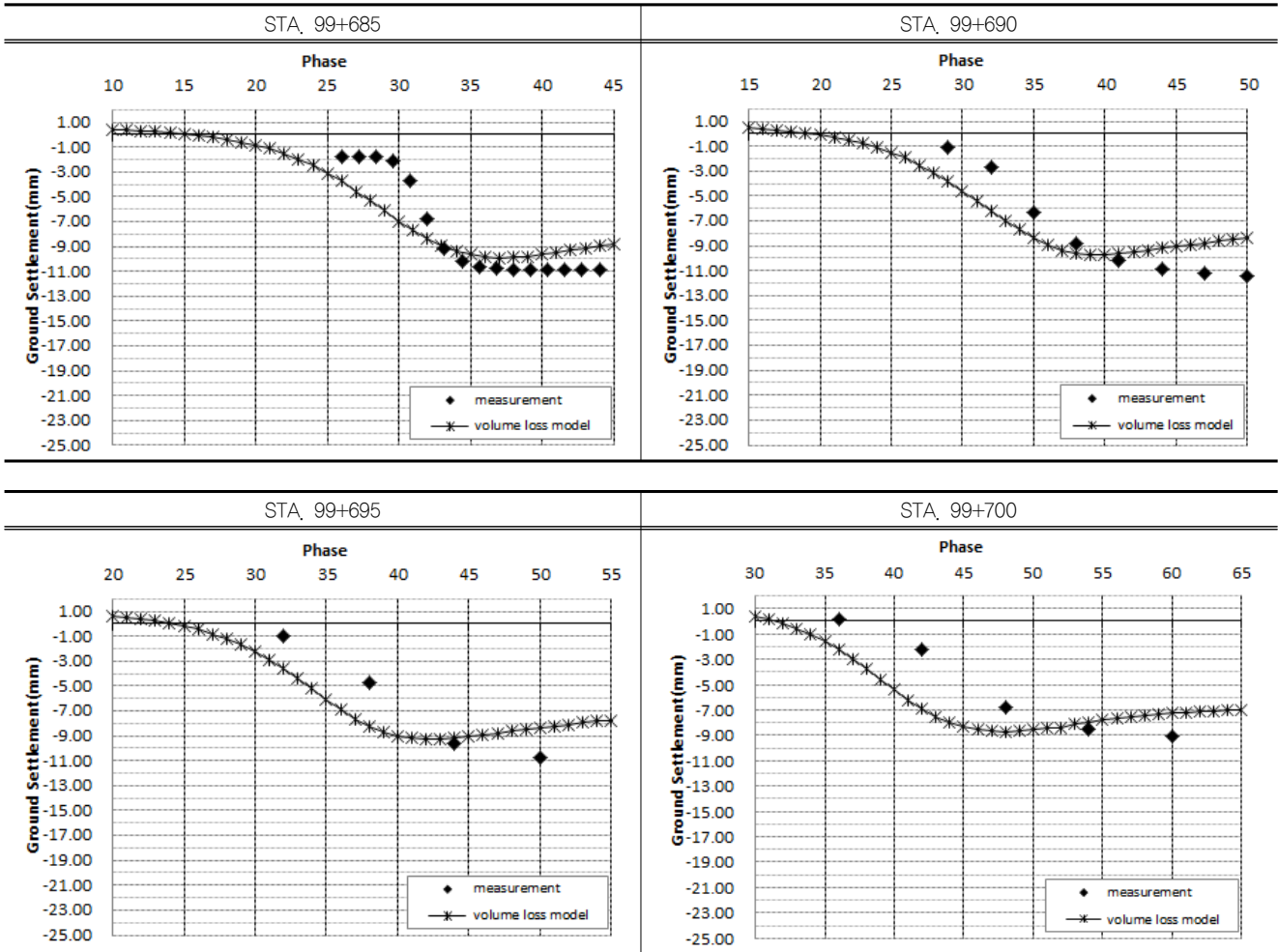


Table 13. Analysis results of volume loss model

Measure point	Measurement (mm)	Analysis result (mm)	difference (mm)	comparison (%)
99+685	-10,900	-9,938	0,962	91,18%
99+690	-11,900	-9,708	2,192	81,58%
99+695	-11,268	-9,219	2,049	81,81%
99+700	-9,488	-8,708	0,780	91,78%

loss model 해석 결과 종방향 침하량은 계측값과 최소 0.78mm ~ 최대2.19mm의 차이를 보여 81.6 ~ 91.8%의 일치성을 보였다. 모든 계측지점에서 계측값과 해석결과는 유사한 결과를 나타냈으며, 통과지층의 영향은 낮게 나타났다(Park et al., 2015)

#### 4.4.2 Pressure model 침하량 결과(종방향)

해석 영향요소검토 결과를 반영하여 skinplate 주면압 크기와 적용구간의 변화를 주어 해석하였다. Pressure model 해석결과 skinplate 주면압을 전구간 막장압의 크기로 적

용시 종방향 침하량은 계측값과 최소0.58mm ~ 최대1.26mm의 차이를 보여 유사하게 나타났으며, 87.9% ~ 94.7%의 일치성을 보였다. STA.99+700의 경우 CDG지반을 관통하지만 터널 천단부에 Alluvium과 만나는 상대적으로 지반이 연약한 구간으로 최종침하량은 10.5m face pressure를 적용한 해석결과와 10.5m grout pressure를 적용한 해석결과의 중간정도 값을 보였다.

#### 4.4.3 Pressure model 침하량 결과(횡방향)

Pressure model에서 Skinplate 주면압을 뒷채움 그라우



Table 14. Analysis results of pressure model

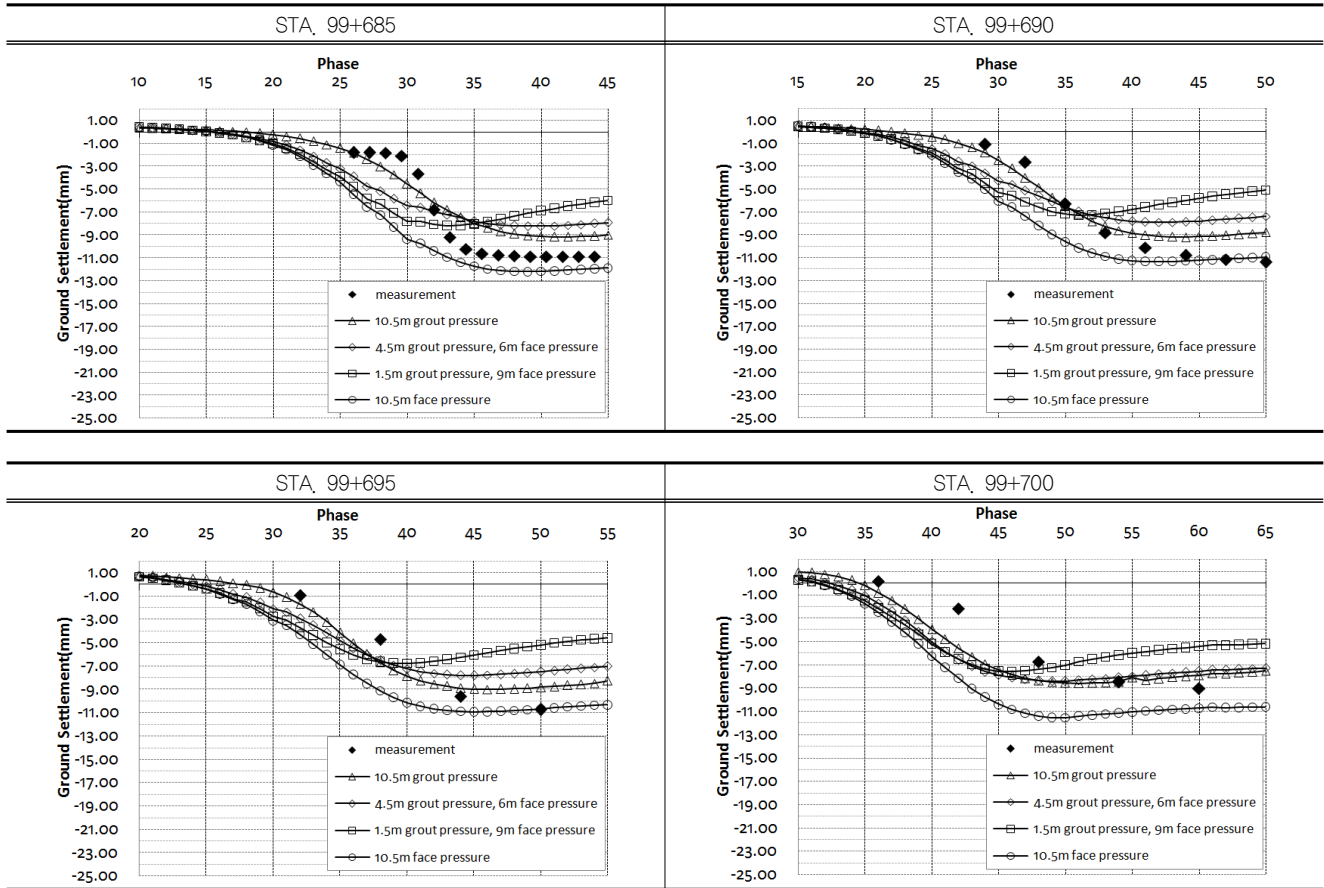


Table 15. Analysis results of pressure model

Measure point	Measurement (mm)	Case2 (10.5m grout pressure)			Case3 (6.0m face pressure, 4.5m grout pressure)		
		Analysis result (mm)	difference (mm)	comparison (%)	Analysis result (mm)	difference (mm)	comparison (%)
99+685	-10,900	-8,047	2,853	73.82 %	-7,192	3,708	65.98%
99+690	-11,900	-8,055	3,845	67.69 %	-6,831	5,069	57.41%
99+695	-11,268	-7,876	3,392	69.90 %	-6,684	4,584	59.32%
99+700	-9,488	-7,519	1,969	79.25 %	-7,291	2,197	76.85%

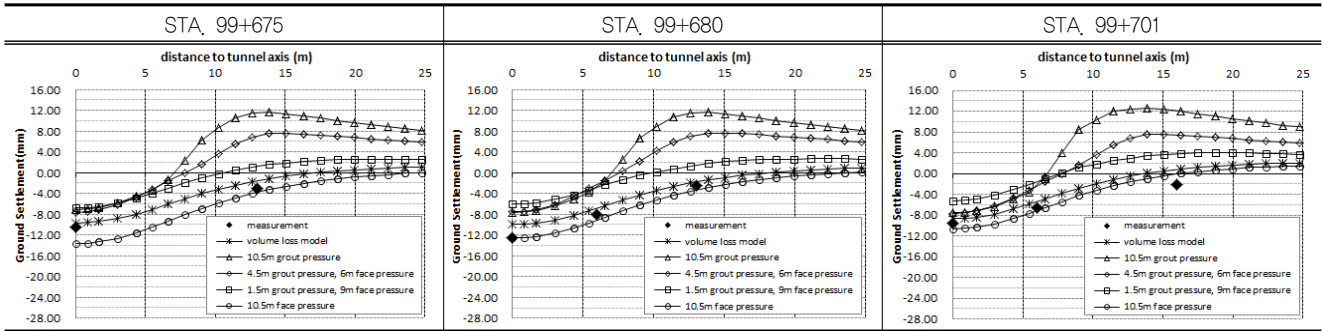
Measure point	Measurement (mm)	Case4 (9.0m face pressure, 1.5m grout pressure)			Case5 (10.5m face pressure)		
		Analysis result (mm)	difference (mm)	comparison (%)	Analysis result (mm)	difference (mm)	comparison (%)
99+685	-10,900	-5,172	5,728	47.45 %	-11,475	0,58	94.7%
99+690	-11,900	-4,545	7,355	38.20 %	-10,642	1,26	89.4%
99+695	-11,268	-4,299	6,969	38.15 %	-10,186	1,08	90.4%
99+700	-9,488	-5,206	4,282	54.87 %	-10,634	1,15	87.9%

팅압으로(400kPa) 적용시 지표에 과도한 융기 현상이 발생 하였으며 막장압(175~215kPa) 적용시 계측값과 유사한 지표침하가 발생하였다.

### 5. 결론

실드TBM 수치해석시 막장압, Skinplate 주면압, 굴진장, Soil model, 요소크기에 따른 영향에 대한 검토를 진행한 결과 지표침하에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 Skinplate

Table 16. Analysis results of pressure model



주면압과 Soil model인 것으로 판단된다. 따라서 막장압보다 Skinplate 주면압 관리가 중요 사항임이 예상되고 해석 적용시 적정 Skinplate 주면압과 Soil model 적용이 필수라 판단된다.

Volume loss model을 적용한 3차원 변위 제어해석에서 주요영향인자는 지반의 Volume loss 값이며, 적절한 Volume loss 값을 산정할 경우 현장의 지표침하를 예상할 수 있을 것으로 판단된다.

Pressure model을 적용한 응력제어해석에서 Skinplate 주면압의 크기를 뒷채움 그라우팅압(400kPa)으로 적용시 일부구간 및 횡방향 변위는 지표면 용기가 과도하게 발생하여 예측값과 유사한 결과를 얻을 수 없었다. Skinplate 주면압의 크기를 막장압(175~215kPa)으로 적용시 현장 예측값과 유사한 지표침하 결과를 얻을 수 있었다.

Pressure model을 적용한 3차원 응력제어해석에서 주요 영향인자는 Skinplate 주면압이며, Skinplate 주면압을 뒷채움 그라우팅압 등 일률적인 값을 적용하는 것은 과다한 지표면 용기, 부정확한 해석결과를 얻을 수 있으므로 현장 요건에 적합한 값을 적용하여야 한다.

굴착 후 바로 변위가 발생하는 지반에서는 Skinplate 주면압에 따라 결과값 차이가 크게 발생하므로 Pressure model 보다는 Volume loss model을 적용하는 것이 적절하다 판단되며, 굴착 후 어느정도 막장면 자립이 가능한 지반에서는 Skinplate 주면압이 뒷채움 그라우팅압 보다는 막장압에 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

홍콩 OO지하철 현장 검토 구간 외에 현장 내 다른 구간, 타 현장에 대한 추가검토를 진행할 예정이며 검증과정을 거치면 타 현장에도 적용 가능한 해석 가이드라인 작성이 가능할 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

The research was supported by the Construction Technology Research Project through the Ministry Of Construction & Transportation, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (Development of Key Subsea Tunnelling Technology, 13 Construction Research T01)

## References

1. Chnag, S.B. (2015), *A Study of Shield TBM Tunnelling-induced Volume Loss Estimation Considering Shield Machine Configurations and Driving Data*, TUNNEL & UNDERGROUND SPACE Vol.25, No.5.
2. Cho, J.S. (2008), *Analysis of ground movements and lining segment in shield TBM based on three dimensional finite element method*, Pukyong National University.
3. FHWA, 2009, Road Tunnel Manual (FHWA-NHI-09-010)
4. Jun, G.C., Kim, D.H. (2016), *A Intercomparison on the estimating shield TBM tunnel face pressure through analytical and numerical analysis*, J of Korean Tunn Undergr Sp Assoc, Vol.18 No.3.
5. Jun, G.C., Kim, D.H. (2015), *A study on key factors of ground surface settlement due to shield TBM*.
6. LIM KEN CHAI (2003), *Three-dimensional finite element analysis of earth pressure balance tunnelling*, National university of singapore.
7. Park, H.K., Chang, S.B., and Lee, S.B. (2015), *A Study of Shield TBM Tunnelling-induced Volume Loss Estimation Considering Shield Machine Configurations and Driving Data*, Samsung C&T Corp. excavation using 3-dimension numerical analysis, J of Korean Tunn Undergr Sp Assoc, Vol.17 No.3
8. SVEN CHRISTIAN MÖLLER. (2006), *Tunnel induced settlements and structural forces in linings*, Eigenverlag des Instituts für Geotechnik.