연약지반에서의 쉴드 TBM 굴착시 막장면 안정성 평가를 위한 실험적 연구

An Experimental Study on Shield TBM Tunnel Face Stability in Soft Ground

김용만 · 이상덕 · 추석연 · 고성일*

Yong-Man Kim · Sang-Duk Lee · Seok-Yeon Choo · Sung-Yil Koh

Abstract In this study, we carried out an experimental shield TBM excavation model test using a down-scale device in soft clay, to understand tunnel-face stability properties in relation to changes in slurry pressure. We performed five tests according to tunnel depth (0.5D, 0.75D, 1.0D, 1.25D, 1.5D), and compared theoretical tunnel-face pressure with model test results. The range in theoretical tunnel-face slurry pressure ($P_{\min} \leq P_{\text{slurry pressure}} \leq P_{\max}$), which is determined by earth pressure and water level, was very similar to the model test result. This result was due to the more isotropic condition of the soft clay ground, than of rocky ground.

Keywords : Shield TBM model test, Slurry shield TBM, Tunnel face slurry pressure

초 록 본 논문은 연약지반 쉴드 TBM 축소 모형실험을 통하여 슬러리에 의해 가해지는 막장 지보압의 변화에 따른 터널 막장면 안정성 변화 양상을 파악하고자 토피고에 따라 0.5D, 0.75D, 1.0D, 1.25D, 1.5D의 총 5개 Case에 대하여 모형실험을 수행하였으며, 이론적인 터널 막장면 지보압 및 모형실험으로 선정된 적정 지보압 값을 상호 비교하였다. 암반 쉴드 TBM과 달리 연약지반 쉴드 TBM의 경우 균질한 지반조건임에 따라 모형실험으로부터 산정된 적정 지보압이 터널 심도에 따른 막장면 토압 및 수압으로부터 이론적으로 산정된 막장압 범위 ($P_{\min} \leq P_{\text{slurry pressure}} \leq P_{\max}$)와 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

주요어 : 쉴드 TBM 모형실험, 슬러리 쉴드 TBM, 터널 막장면 슬러리 압력

1. 서 론

1987년 12월 한국전력공사의 부산지역 전력구 공사를 시작으로 하여 쉴드 TBM터널링 공법은 국내에서 많은 관심을 가지는 공법 중 하나이다. 최근에는 국내에서도 서울, 광주, 부산 등의 도심지 지하철 시공기술을 넘어서 표준관입 시험(SPT)의 N값이 5이하인 매우 연약한 지반조건에서도 쉴드 TBM을 시공할 정도로 많은 기술력이 확보되어야 하는 중요한 터널링 공법이 되어 가고 있다.

쉴드 TBM적용시의 이론적인 막장 지보압 산정방법에 대해서는 Horn [3]이 처음으로 터널굴진면에 3차원적 파괴면을 가정한 터널막장압 산정이론을 제시하였으며, Xanthakos [7]는 슬러리에 관한 전반적인 연구를 수행하였다. Anagnostou와 Kovari [1,2] 등에 의하여 이토압식(EPB) 내지 이수식(Shurry) 쉴드터널의 막장밀폐 형식별 이론적 막장 지보압 산정방법들이 제안되었다. Anagnostou와 Kovari [1,2]는 멤브레인 모델에 근거하여 막장의 안정성에 필요한 소요지보압을 구하는 메커니즘을 제시하였는데 내부마찰각이 30°보다

크면, 지하수위 높이나 지표면으로부터 터널의 심도에 관계없이 소요압 $\Delta P=20\text{kPa}$ 정도를 제안하였다.

또한 실트 또는 사질성 지반에서의 이수압식 쉴드 TBM 적용시, 막장 안정성 확보를 위해서는 막장 전방으로의 이막(Filter Cake) 형성여부가 매우 중요한 사안이며, 이에 대해서는 국내의 경우 Lee등 [4]과 Koh 등 [6]에 의하여 연구된 바가 있으며, 해외의 경우 Müller [5]에 의하여 연구되었으나, 이수압식 쉴드 TBM적용 사례가 많지 않은 국내 실정상 터널 굴착시 막장 안정성 측면에서의 기초연구가 부족한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 연약지반을 대상으로 한 축소 모형 실험을 통하여 터널 토피고별 막장 안정성 변화 추이와 터널심도에 따른 지반거동양상을 고찰하였다

2. 본 론

2.1 실험장비 제작 및 실험방법

2.1.1 실험 장비 및 토조 제작

쉴드 TBM 축소 모형 실험기는 실제 터널 크기의 1/40규모의 2차원 쉴드 모형실험장비로서 길이 2.0m, 높이 1.8m, 직경 0.3m이며, 모형지반은 길이 1.2m, 높이 1.2m 및 폭 0.5m로 제작하여 쉴드 장비내에서 이수압식에 막장면과

*Corresponding author.

Tel.: +82-31-776-0070, E-mail : sungvil@empal

©The Korean Society for Railway 2013

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.1.047>

Fig. 1 Test box

Fig. 2 Test box outline

주변지반의 거동을 측정할 수 있도록 고안하였다. 굴진중에 굴진면의 수평이동이 가능하게 하였으며, 수평이동시 슬러리가 측벽으로 세어 나오지 않도록 고무판을 부착하였다. 굴진중 토압 및 간극수압 측정을 위하여 Load Cell(측정범위 : 0~4.9kN) 및 간극수압계(측정범위 : 0~196kPa)를 설치하였다. (Fig. 1 및 Fig. 2 참조). 굴착실험을 위한 토사는 대상 현장 지반(통일분류법상 : CL, Table 1 참조)을 실험실로 운반하여 사용하였으며, 지반조성 시 균등한 지반조성을 위해 층별로 지반조성 후 실험에 영향을 미치지 않는 지반에서 배인실험과 콘관입시험을 실시하여 균질한 지반이 조성되도록 하였다.

실험에 사용된 슬러리는 농도 5%로 벤토나이트를 증류수와 혼합하였으며 24시간의 안정화를 거친 후 사용하였다. 실험에 사용된 벤토나이트는 실제 쉘드 TBM터널 굴착시 사용되는 것으로서 (주)한국수드케미에서 판매하는 TIXOTON STANDARD를 사용하였으며, 주요 특성은 Table 2와 같다.

2.1.2 모형시험 방법

본 쉘드 TBM 축소 모형실험에서는 터널심도, 이수압을 변수로 실험 Case를 산정하였다. 지반파괴에 영향을 미치는 인자 중 하나인 가압속도는 지표면위를 확인하면서 가압속도에 변화를 주는 예비실험을 수행하여 지반거동이 최소로 발생하는 가압속도를 적용하였다. 모형실험에는 1mm/min의 가압속도를 적용하였다. 터널심도는 실험 Case별로 0.50D, 0.75D, 1.00D, 1.25D, 1.50D로 하였으며, 굴착실험시 구간별로 이수압을 높이거나 낮추어 이수압 변화에 따른 지반변

Table 1 Properties of the model ground

Unit weight (kN/m ³)	Specific gravity	Water content (%)	Plasticity index (I_p)	Inner friction angle (°)	Cohesion (kN/m ²)
16.5	2.52	52.55	38.32	3.7	10

Table 2 Properties of the bentonite used in the model test

Water content (%)	Degree of swelling (ml/g)	Apparent vspecific gravity	pH	Grain size (#200 sieve) (%)
≤ 12	≥ 10	0.75 ~ 0.85	≤ 11	≤ 20

Table 3 Test case

Ground water	Case	Tunnel depth	Ground condition of model ground
G.L.-0.0m	Case 1	0.50 D	- tested by soil in situ after transporting to lab
	Case 2	0.75 D	
	Case 3	1.00 D	
	Case 4	1.25 D	
	Case 5	1.50 D	-USCS (United Soil Classification System) : CL

위 양상을 파악하였으며, 최종적으로는 이수압에 의한 지반할렬 파괴가 발생하는 단계까지 이수압을 가압하여 파괴시 가압하중을 확인하였다. 실험 Case는 Table 3과 같으며, 각 Case별 실험을 위한 준비 과정과 굴진과정중의 구간별 이수압 적용 개요(Case 2 토피고 0.75D 조건)는 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다.

2.2 실험결과 분석

2.2.1 터널 심도별 적정 이수압 산정결과

연약지반 쉘드 TBM 시공실험이 매우 많은 일본의 경우 경험적으로 터널 굴진시의 막장압은 다음과 같은 범위에서 선정한다.

$$P_{\min} \leq P \leq P_{\max} \quad (1)$$

$P_{\min}$: 굴진면에서 가해지는 막장압 중, 예상 최소값으로서 수압 + 주동토압 + 부가압력으로 산정(부가압력은 통상적으로 20kPa 적용)

$P_{\max}$: 굴진면에서 가해지는 막장압 중, 예상 최대값으로서 수압 + 정지토압으로 산정

부가토압으로 산정되는 20kPa는 설계시 지반정수의 불확실성으로 인하여 예측토압이 과소하게 산정될 수 있는 조건을 고려함과 동시에 시공중 쉘드 TBM 장비의 조작 실수 또는 토압계이지의 계측오차등을 고려하여 안정성 발생을 최소화하기 위한 경험적인 값이다. 모형시험에서는 1/40 규모

Fig. 3 Test Procedure

Fig. 4 Slurry pressure for each excavation length (Case 2, 0.75D condition)

의 scale effect를 고려해 부가압력없이 최소막장압(P_{min})은 수압과 주동도압만 고려하였다.

Table 4은 토피고 1.0D조건에서 구간별 굴착 이수압 변화 조건 및 지표변위에 대한 계측 그래프로서 이수압 7.8kPa조건에서 지표면 변위발생 양상이 가장 안정적으로 계측되며 이때의 이수압을 적정 이수압으로 선정하고 각각의 토피고별 적정 이수압값을 Table 5와 같이 분석·정리하였다.

분석결과 터널 심도가 제일 작은 Case 1(천단 토피고 15cm)을 제외하고 Case 2 ~ Case 5 모두에서 모형실험시의 적정이수압(P)이 $P_{min} \leq P \leq P_{max}$ 범위내에서 만족하고 있음을 확인 할 수 있었다. 다만 Case 1의 경우 천단토피고가 매우 미소하여 막장압과 지표변위와의 민감도가 매우 높은 관계로 P_{min} 값보다 적은 값에서 적정 이수압이 측정된 것으로 판

단된다.

2.2.2 터널 심도별 막장면 할렬 발생 압력

굴착 실험 중, 최종 단계에서 막장압을 계속적으로 증가시켜 각각의 터널 토피고에 따른 막장면 할렬 발생압력을 확인하였다. 여기서 할렬 발생압력이라 함은 과다한 이수압력으로 인한 지반파괴를 의미하는 것으로 이수압력이다.

시공시 막장압 관리 범위 중 최대값에 해당하는 수압+정지도압 및 지반할렬 발생 압력을 비교한 결과, 관리 이수압 P_{max} 대비 최소 186.3%에서 최대 233.0% 큰 압력에서 지반 할렬이 발생되고 있음을 확인하였다. 이를 통하여 시공중 과다한 이수압에 의한 지반붕괴가 발생하는 상황은 발생하기 어렵다는 것을 확인 할 수 있었으며, 다만, 연약한 천층터널 조건에서 관리 이수압이 과다할 경우 지표면 융기가 발

Table 4 Slurry pressure conditions and ground settlement of each excavation step of 1.0D cover-depth condition

<p>0~10 Section General excavation (None of slurry pressure)</p>	<p>B. 10~15 section Excavation with 5.9kPa of slurry pressure</p>
<p>C. 15~20 section Excavation with 4.4kPa of slurry pressure</p>	<p>D. 20~25 section Excavation with 5.9kPa of slurry pressure</p>
<p>E. 25~30 section Excavation with 7.8kPa of slurry pressure</p>	<p>F. 30~35 section Excavation with 4.4kPa of slurry pressure</p>
<p>G. 35~40 section Excavation with 2.9kPa of slurry pressure</p>	<p>H. 40~45 section Excavation with 1.5kPa of slurry pressure</p>

Table 5 Theoretical slurry pressure and proper slurry pressure during model test

Test Case (unit : kPa)	Theoretical slurry pressure (based on the center of the tunnel face)		Proper slurry pressure in test	Note
	Water pressure + Earth pressure at rest ($P_{\max}$)	Water pressure + active earth pressure ($P_{\min}$)		
Case1(0.50D)	5.8	4.6	3.4	Proper slurry pressure was measured between $P_{\min}$ and $P_{\max}$ in most cases
Case2(0.75D)	7.3	5.8	5.9	
Case3(1.00D)	8.6	7.0	7.8	
Case4(1.25D)	10.1	7.7	8.1	
Case5(1.50D)	11.5	8.7	9.2	

Table 6 Slurry pressure when hydraulic fracturing occurred

	Maximum face pressure under construction : water pressure + earth pressure at rest	Hydraulic failure pressure of ground	Rate (%)
Case1 (0.50D)	5.8kPa	12.9 kPa	222.4
Case2 (0.75D)	7.3kPa	13.6kPa	186.3
Case3 (1.00D)	8.6kPa	19.4kPa	225.6
Case4 (1.25D)	10.1kPa	21.7kPa	214.9
Case5 (1.50D)	11.5kPa	26.8kPa	233.0

생될 가능성이 있으므로 시공중 막장압 관리는 매우 중요한 시공관리 항목이 된다.

3. 결 론

연약지반 쉴드 TBM을 대상으로 한 터널 토파고별 막장 안정성 변화추이 및 지반거동을 고찰하기 위하여 쉴드 TBM 축소 모형실험을 수행하였다. 쉴드 TBM 축소 모형 실험기는 실제 TBM크기의 1/40 규모로 하여 길이 2.0m, 높이 1.8m 및 직경 0.3m로 제작하였으며, 총 5 Case에 대한 터널 토파고(0.50D, 0.75D, 1.00D, 1.25D, 1.50D)별 모형 굴착 실험을 수행하였다. 토파고 별 적정 이수압 및 할렐과파 발생에 대한 본 논문의 결론은 다음과 같다.

(1) 시공중 이론적인 막장압 관리범위 및 모형 굴착시험에 의한 적정 이수압 산정결과, 토파고가 제일 작은 Case 1(0.50D)을 제외하고, 모든 실험 Case에서 적정 이수압이 이론적인 시공시 막장압 관리범위내에 있어, 이론치가 적합함을 확인하였다. 이는 연약지반 쉴드 TBM의 경우 암반굴착시의 조건보다 균등한 지반상태이기 때문인 것으로 판단할 수 있다. Case 1에서는 적정이수압이 이론치보다 낮게 나타났는데, 이는 천단토파고가 낮아 민감도가 매우 높기 때문으로 판단된다. 토파고가 0.5D이하로 낮은 경우 이수압 조절의 어려움으로 지반이 융기하거나 침하할 가능성이 높기 때문에 시공중 지표변위 계측을 통하여 적절한 이수압 조절이 이루어져야 할 것이다.

(2) 각각의 실험 Case마다 최종 단계에서 이수압을 최대한 높여 지반 할렐 파괴압력을 확인한 결과, 시공시 막장압 관리 범위중 최대 이수압(P_{max})보다 186.3~233.0%높은 값을 보였다. 이는 연약지반 쉴드 TBM굴착 중, 과다한 이수압으로 인한 지반 붕괴는 발생하기 어려우며, 적정 이수압 적용에 따른 지표면 침하 또는 융기에 대한 시공관리가 중요하다는 것을 의미한다.

참고문헌

- [1] Anagnostou, G., Kovari, K. (1994) The face stability of slurry-shield-driven tunnels, *Tunnelling and Underground Technology*, 9(2), pp.165-174.
- [2] Anagnostou, G. and Kovari, K. (1996) Face stability conditions with earth-pressure-balanced shields, *Tunnelling and Underground Technology*, 11(2), pp.165-173.
- [3] Horn, N. (1961) Horizontal earth pressure on the vertical surfaces of the tunnel tubes, *National Conference of the Hungarian Civil Engineering Industry*, Budapest, pp.7-16.
- [4] I.M. Lee, S. Lee, K.H. Cho. (2004) Face stability assessment of slurry-shield tunnels, *Journal of Korea Geotechnical Society*, 20(6), pp. 95-107.
- [5] Müller-Kirchenbauer, H. (1972) *Stability of Slurry Trenches*, Proc. 5th Eur. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Madrid, 1, pp. 543-553.
- [6] S.Y. Koh, J.S. Kim, K.J. Kim, G.Y. Lee, S.Y. Choo. (2006) A study of the tunnel face stability change considering the slurry properties in slurry shield, *Korea Tunneling Society Autumn Symposium*.
- [7] Xanthakos (1979) *Slurry Walls*, McGraw-Hill.

접수일(2012년 10월 4일), 수정일(2012년 11월 2일),
게재확정일(2013년 1월 31일)

Yong-Man, Kim : ymkym1004@hanmail.net

General manager, POSCO E&C, POSCO E&C Tower 1, 36 Song-Do-Dong, Yeonsu-Gu, Incheon, Korea

Sang-Duk, Lee :

Department of Civil Engineering, Ajou University, San 5 Woncheon-Dong, Yeoungtong-Gu, Suwon, Korea

Seok-Yeon, Choo : danwchoo@hanmail.net

DANWOO E&C, CEO, 713 Tech-center, SK(n) Techno Park, 190-1, Sangdaewon-Dong, Joongwon, Gu, Sungnam-Si, Gyeonggi-Do, Korea

Sung-Yil, Koh : sungyl@empas.com

DANWOO E&C, Managing Director(R&D Institute), 713 Tech-center, SK(n) Techno Park, 190-1, Sangdaewon-Dong, Joongwon, Gu, Sungnam-Si, Gyeonggi-Do, Korea