

축소모형시험을 통한 연약지반 shield TBM의 screw conveyor 배토효율에 관한 연구

오태상¹ · 김상환² · 김원경^{3*} · 이해윤⁴ · 신민호⁵

¹정회원, (주)삼보기술단 사장, 서울과학기술대학교 철도전문대학원 박사과정

²정회원, 호서대학교 토목공학과 교수

³비회원, 호서대학교 토목공학과 박사과정

⁴비회원, 호서대학교 토목공학과 석사과정

⁵정회원, 한국철도기술연구원 수석연구원

Model test on operation efficiency in the screw conveyor of shielded TBM in soft ground

Tae-Sang OH¹, Sang-Hwan Kim², Won-Kyung Kim^{3*}, Hye-Yoon Lee⁴, Min-Ho Shin⁵

¹Sambo Engineering co. LTD. President, Seoul National University of Science & Technology, Doctor student

²Dept of Civil Engineering, Hoseo University, Professor

³Department of Civil Engineering, Hoseo University, Doctor student

⁴Dept of Civil Engineering, Hoseo University, Graduate student

⁵Korea Railroad Research Institute, Executive Researcher

ABSTRACT: This paper presents the screw conveyor operation efficiency of shield TBM in soft ground. In order to study the screw conveyor operation efficiency, the experimental and theoretical studies were carried out. In experimental study, the operating amounts of muck were examined and compared due to the screw conveyor operating parameters including types (Shaft and Ribbon screw), angles of screw and conveyor. The results obtained from the laboratory model tests were analysed and evaluated to suggest the most suitable muck operating parameters during the shield TBM tunnelling in soft ground. In conclusion, it is found the operation parameters to increase the screw conveyor efficiency. In addition, the information presented in this paper may be useful for developing the design technology of shield TBM in the future.

Keywords: Shield TBM, Screw conveyor, Operation efficiency, Soft ground, Model test

초 록: 본 논문은 shield TBM의 버력 배토장비인 screw conveyor의 최적 버력 배토효율에 관한 연구이다. screw conveyor의 배토효율에 영향을 미치는 주요 Parameter인 screw 형태(Shaft식, Ribbon식), screw conveyor와 screw 각도의 영향을 분석하기 위하여 축소모형시험을 실시하였다. 축소모형시험을 통해 구한 버력 배토 효율과 기존 이론식을 통해 구한 최적의 버력 배토효율을 비교 분석하여 최적의 screw 형태, screw conveyor와 screw각도를 도출 할 수 있었다. 결론적으로 축소모형시험을 통하여 screw conveyor 설계인자들에 대하여 제시하였다. 또한 이 연구 결과는 향후 shield TBM 기술을 발전시키는데 유용할 것으로 기대된다.

주요어: Shield TBM, 스크류 컨베이어, 배토 효율, 연약지반, 축소모형시험

1. 서론

최근 도로, 철도, 지하철, 전력구, 통신구, 상하수도

터널 등 다양한 터널에 널리 적용되고 있는 shield TBM (Tunnel Boring Machine) 터널 공법은 다른 터널 공법에 비하여 굴진속도가 빠르며, 비교적 안전하게 공사를 수행할 수 있고, 원형단면으로 불필요한 공간의 발생을 최소화 할 수 있는 장점이 있다(장경국, 2008).

*Corresponding author: Won-Kyung Kim
E-mail: won0474@nate.com

Received March 5, 2014; Revised March 14, 2014;
Accepted March 18, 2014

Slurry shield TBM, EPB (Earth Pressure Balance) shield TBM 등 적용 장비에 따라 굴진면 거동이 달라지기 때문에 굴진면 안정성 확보를 위한 굴진면 압력의 산정이 중요한데, EPB shield TBM 공법의 경우 막장면 안정성 확보를 위하여 커터에 의해 굴착된 토사를 소성 유동화 시키면서 Chamber 내에 충만·압축시켜 막장면을 지지하며, screw conveyor 등 배토 조절장치를 통한 배토량의 조절로 Chamber 내의 토사와 동일한 압력을 유지하여 막장면의 토압·수압에 저항시킨다. 또한 Chamber와 screw conveyor내에 충만·압축시킨 토사를 통해 지수효과를 얻는다. 즉, EPB shield TBM에서의 굴착면 안정은 Chamber, screw conveyor 등에 충만·압축된 버력에 의한 지반 접촉부에서의 유효응력 확보와 Chamber 내 토압 조절에 좌우된다(한국터널공학회, 2008).

Raffaele 등(2008)은 screw conveyor 축소모형장비를 이용하여 screw conveyor의 Parameter 및 지반 조건에 따라 시험을 수행하였고, Owen 등(2009)은 DEM을 적용하여 단일 피치 screw conveyor의 운전 조건의 변화에 따른 영향을 검토하였다. 또한 Merritt 등(2006, 2008)는 실제 screw conveyor 장치를 사용하여 점토지반에서 배토 효율에 대한 시험을 수행하였으며, Daniele 등(2007)은 screw conveyor 축소모형시험을 통하여 사질토 지반에서 Form에 따른 최적의 배토효율을 검증하였다. Bezuijene 등(2001)은 토양의 거동에 관해 실제 screw conveyor 장치와 축소모형을 통하여 연구를 수행하였다. 국내의 경우 김상환 등(2011)은 축소 제작한 screw conveyor 실내모형

시험을 통해 단위시간당 버력량을 비교 분석하였다. 이와 같이 국외의 경우 EPB shield TBM장비의 핵심 기술인 screw conveyor에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는 반면 국내의 경우 관련 연구가 미흡한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 shield TBM의 버력 배토장비인 screw conveyor의 최적 버력 배토효율에 대한 실험적 연구로서 screw conveyor의 배토효율에 영향을 미치는 주요 인자들(screw conveyor와 screw의 각도 등)의 영향을 분석하기 위하여 축소모형시험을 실시하고 기존 이론식을 통해 비교 분석 하였다.

2. screw conveyor 이론적 분석

EPB shield TBM은 커터헤드 후면의 Chamber를 굴착토 또는 버력으로 가득 채워 굴진면을 지지하며 굴진하게 된다. 일반적으로 굴진면에 screw conveyor 회전력에 의한 주동 토압이 발생하지 않도록 굴진면 토압을 screw conveyor에 전달하기 위해 소성 유동화한 굴착토를 Chamber 내에 가득 채우는 것이 매우 중요하다. 또한 굴진면 지지압력은 TBM 굴진속도와 screw conveyor의 회전수에 의해 제어된다. 따라서 EPB shield TBM은 굴진면 토압을 screw conveyor를 통해 제어하면서 토사의 원활한 유입과 TBM의 추진이 동시에 이루어질 수 있기 때문에 굴진면을 유지하기 쉽고 지반변형 발생을 최소화할 수 있기 때문에 이러한 이유로 screw conveyor의 설계기술은 EPB shield TBM의 굴진에 있어 중요한 요소라 할 수 있다(한국터널공학회, 2008).

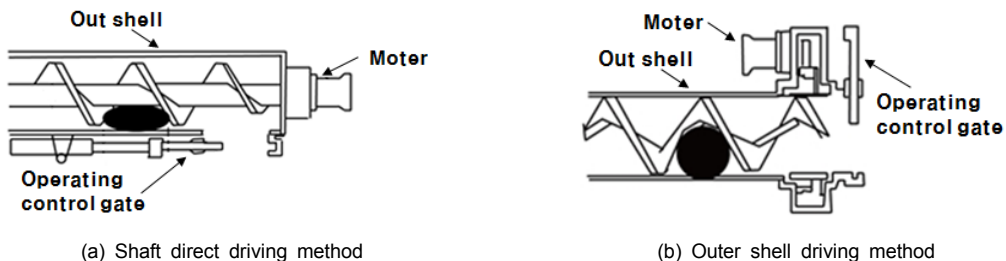


Fig. 1. Screw conveyor operation method (社団法人 地盤工學會, 1997)

screw의 형태는 크게 샤프트식 screw와 큰 자갈 반출에 유리한 리본식 screw가 있다. screw 형태는 반출 가능한 자갈의 크기, screw conveyor 직경, 굴착 지반, 지하수압 등을 고려하여 선택해야하며, 일반적으로 지수성을 중시하는 경우 리본식 screw를 선정한다.

screw conveyor의 구동방식은 축 직결 구동방식과 외통 구동방식으로 나눌 수 있으며, Fig. 1과 같이 샤프트식 screw 경우는 screw의 축과 구동장치를 일렬로 연결하는 축 직결 구동방식을 많이 사용하고, 리본식 screw의 경우는 축이 없기 때문에 외통을 직접 구동하는 외통 구동방식을 많이 사용한다(社団法人地盤工学会, 1997).

screw conveyor의 이론적 메카니즘에 대하여 MIGUEL (2007)은 사질토 지반에 대한 Soil conditioning 조사와 사질토 지반에 대한 EPB screw conveyor 모델에 대한 실험적 연구를 실시하였으며, 이를 통해 Fig. 2를 참조하여 screw 직경, screw 피치, screw 회전력에 따른 최적 배토량은 이론적으로 다음 식 (1), (2)와 같이 도출하였다.

본 논문은 점토 지반에 적합한 새로운 이론식을 도출하기 위해 축소모형시험을 실시하였으며, 사질토 지반에 대한 이론식을 바탕으로 screw conveyor 각도 (α)를 추가적으로 고려하여 비교 분석을 실시하였다.

$$\text{샤프트식 } Q_{\max} = \frac{\pi}{4}(D^2 - D_i^2)(p - t_s)w \text{ (m}^3/\text{sec)} \quad (1)$$

$$\text{리본식 } Q_{\max} = \frac{\pi}{4}D^2(p - t_s)w \text{ (m}^3/\text{sec)} \quad (2)$$

여기서, D = Screw diameter (m)

D_i = Core or shaft diameter (m)

p = Screw pitch (m)

w = Angular velocity of screw (rev/s)

t_s = Thickness of screw blade (m)

3. screw conveyor 축소모형시험

3.1 축소모형시험 개요

김상환(2011)은 EPB shield TBM의 screw conveyor 시스템에 관한 실험적 연구에서 축소율 1:45.5을 적용한 소형 축소모형 시스템을 통한 시험을 실시하였다. screw conveyor 각도, screw 각도, RPM에 따른 버력 처리시스템의 최적의 성능을 도출하기 위해 실시한 연구로 단위시간당 배토량을 측정된 결과, screw conveyor 각도, screw 각도, RPM이 모두 증가할수록 버력의 단위시간당 배토량이 증가하는 것으로 측정되었다. 그러나 함수비가 일정 이상이 될 경우 버력이 역류하는 현상을 보였기 때문에 본 연구에서는 버력이 역류하지 않으며, 현장 시공시 많이 사용되는 범위인 screw conveyor의 각도 $20^\circ \sim 30^\circ$ 를 선정하여 screw의 형태와 screw 각도에 따른 최적 버력 배토 효율을 측정하기 위한 축소모형시험을 실시하였다.

본 연구에 활용한 축소모형 시스템은 Fig. 3과 같이 김상환(2014)의 토압식 쉴드 TBM의 후드부 시뮬레

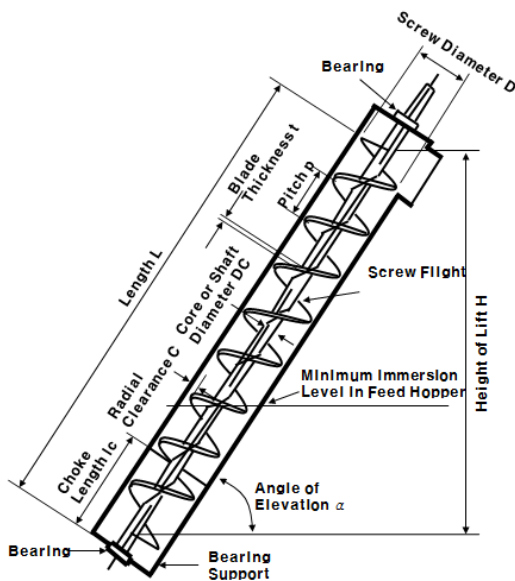


Fig. 2. Screw conveyor theoretical analysis (Roberts, A.W., 1999)

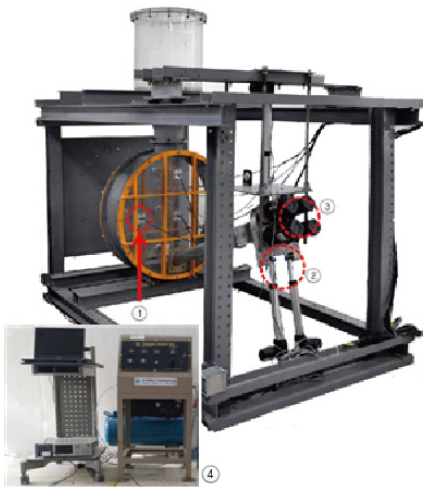


Fig. 3. Simulation system (Kim, S.H. 2014)

이전 장비 시스템 개발에 대한 연구를 통해 구축한 중대형 축소모형 시스템으로 축소율 1:10을 적용하였다. 이를 통해 측정된 단위시간당 배토량을 기존 이론식과 비교 분석 하였다.

3.2 축소모형시험 CASE

한명식(2013)은 시험에 적용된 점토지반에 대해 실내토질시험을 수행하여 Table 1과 같은 특성을 확인하였으며, 본 논문에서는 상기 연구와 동일한 점토 지반을 적용하여 축소모형시험을 실시하였다. 또한 배합비는 상기 연구를 바탕으로 폴리머 혼합액/점토의 경우 30%, 폴리머/물은 0.2%를 선정하였다.

축소모형시험에 사용된 screw conveyor는 Fig. 4(a)와 같이 총연장 1,000 mm, 직경 90 mm로 제작하였으며, screw 구동 방식은 축 구동 방식이다. screw의 형태는 Table 2와 같이 샤프트식과 리본식으로 제작하였다. 시험은 점토 지반에 대하여 Fig. 4(b)와 같이 screw 형태에 따라 screw conveyor 각도(α) 20°, 25°, 30°와 screw 각도(β) 15°, 20°, 25°, 30°를 변경하여 실시하였다. ○○ 현장에서 적용하고 있는 최대 17.8 RPM을 바탕으로 회전수는 20 RPM 으로 선정하였으며, 시험 case는 Table 3과 같다.

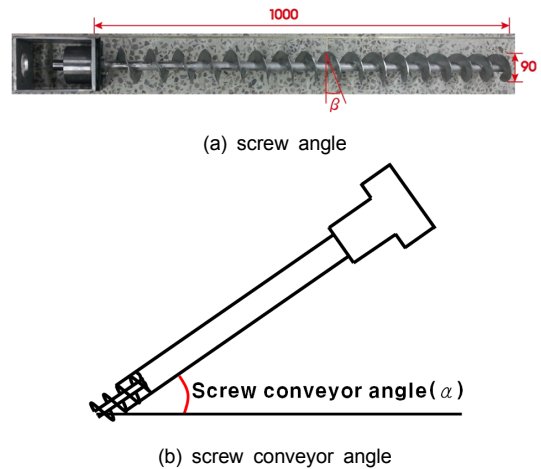


Fig. 4. Scale Model screw

Table 1. Field material property

U.S.C.S	Clay
M/C (%)	25.38
q_u (kN/m ²)	55.97
Cohesion (kPa)	4
ϕ (°)	13.04

4. screw conveyor 축소모형시험 결과

EPB shield TBM의 Hood부 시뮬레이션 시스템을 이용하여 screw 형태, screw conveyor 각도(α), screw 각도(β)에 따른 최적의 버력 배토 효율에 대한 축소모형시험을 각 2회 수행하였으며, screw 형식에 따라 측정된 단위시간당 배토량을 기존의 이론식을 통해 구한 최적 단위시간당 배토량과 비교 분석하였다.

4.1 screw 각도(β)에 따른 배토효율 분석

4.1.1 샤프트식 screw의 단위시간당 배토량 측정 결과

Fig. 5는 샤프트식 screw에 대한 screw conveyor 각도(α) 및 screw 각도(β)에 따른 단위시간당 배토량을 분석한 그래프이다. 샤프트식 screw의 측정된 단위

시간당 최대 배토량은 screw 각도(β)가 15°부터 5°씩 증가할수록 각각 0.056 m³/sec, 0.091 m³/sec, 0.104 m³/sec, 0.115 m³/sec로 증가하였으며, 단위시간당 최대 배토량은 screw conveyor 각도(α) 25°일 때 측정되었다.

4.1.2 리본식 screw의 단위시간당 배토량 측정결과

Fig. 6은 리본식 screw에 대한 screw conveyor 각도(α) 및 screw 각도(β)에 따른 단위시간당 배토량을 분석한 그래프이다. 리본식 screw의 단위시간당 배토량은 샤프트식 screw와 동일한 경향이 나타났다. 리본식 screw의 측정된 단위시간당 최대 배토량은 screw 각도(β)가 15°부터 5°씩 증가할수록 각각 0.080 m³/sec, 0.116 m³/sec, 0.134 m³/sec, 0.141 m³/sec로 증가하였으며, 단위시간당 최대 배토량은 screw conveyor 각도(α) 25°일 때 측정되었다.

4.2 축소모형시험과 이론식과의 결과 비교 분석

기존 이론식과 비교 분석 결과, 기존 이론식은 screw conveyor 각도(α)를 고려하지 않고 도출하였고 본 논문은 screw conveyor 각도(α)를 고려하여 단위시간당 배토량을 측정하였다. 향후 screw conveyor 각도(α)와 점토 지반에 대한 새로운 이론식 도출을 위해 screw 형태에 따른 단위시간당 배토량에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

또한 사질토 지반에 대한 최적 단위시간당 배토량 이론식과 비교 분석한 결과, 측정된 단위시간당 배토량은 최적 단위시간당 배토량 보다 작게 나타났다. 이는 기존 이론식과 모형시험의 지반이 상이하여 나타난 것으로 판단된다. 따라서 점토지반에 적합한 새로운 이론식을 도출하기 위해 단위시간당 배토량에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

Table 2. Scale Model screw


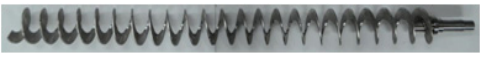

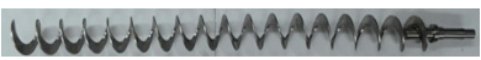

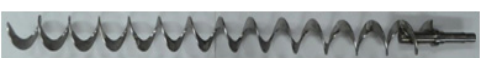


Case	Shaft-type	Ribbon-type	
β	15°		
	20°		
	25°		
	30°		

Table 3. Test case

Case	screw conveyor angle α (°)	screw angle β (°)	RPM	polymer/clay
Shaft type	20	15	20	30% (polymer/water 0.2%)
	25	20		
	30	25		
		30		
Ribbon type	20	15	20	30% (polymer/water 0.2%)
	25	20		
	30	25		
		30		

단위시간당 최대 배토량이 측정된 screw conveyor 각도(α) 25°에서 샤프트식 screw와 리본식 screw의 단위시간당 배토량을 비교한 결과 리본식 screw가 샤프트식 screw보다 약 22% 크게 나타났다. 분석 결과 shield TBM 굴착 시 screw 형태와 screw conveyor 각도(α)가 버력 배토효율에 영향이 미치는 것으로 분석되었으며, shield TBM 시공 시 굴착된 버력의 크기 및 지수성을 고려한 screw 형태의 선정이 필요하다고 판단된다.

또한 screw 각도(β)가 증가할수록 단위시간당 배토량이 증가하는 것으로 나타났으며, 이를 바탕으로 screw conveyor 각도(α) 25°에서 지반 조건에 따른 최적의 screw 각도(β) 선정에 대한 연구가 추가적으로 필요하다고 판단된다.

4.3 모형시험의 Scale factor에 따른 기존 연구와의 비교 분석

김상환(2011)은 축소율 1:45.5를 적용하여 소형 축소모형 시스템을 이용하여 제한적인 screw 조건에서 시험을 실시하였으며, 이를 바탕으로 본 논문에서는 축소율 1:10을 적용한 Hood부 시스템 축소모형시험을 실시하였다.

김상환(2011)의 시험 case에서 본 연구와 동일한 조건인 샤프트식 screw 형태와 20 RPM의 회전수, 점토의 함수비 25%, screw conveyor의 각도 20°, 30° 일 때 단위시간당 배토량은 screw conveyor 각도가 증가할수록 감소하는 경향이 나타났으며, 피치 간격 즉 screw 각도(β)가 증가할수록 단위시간당 배토량이

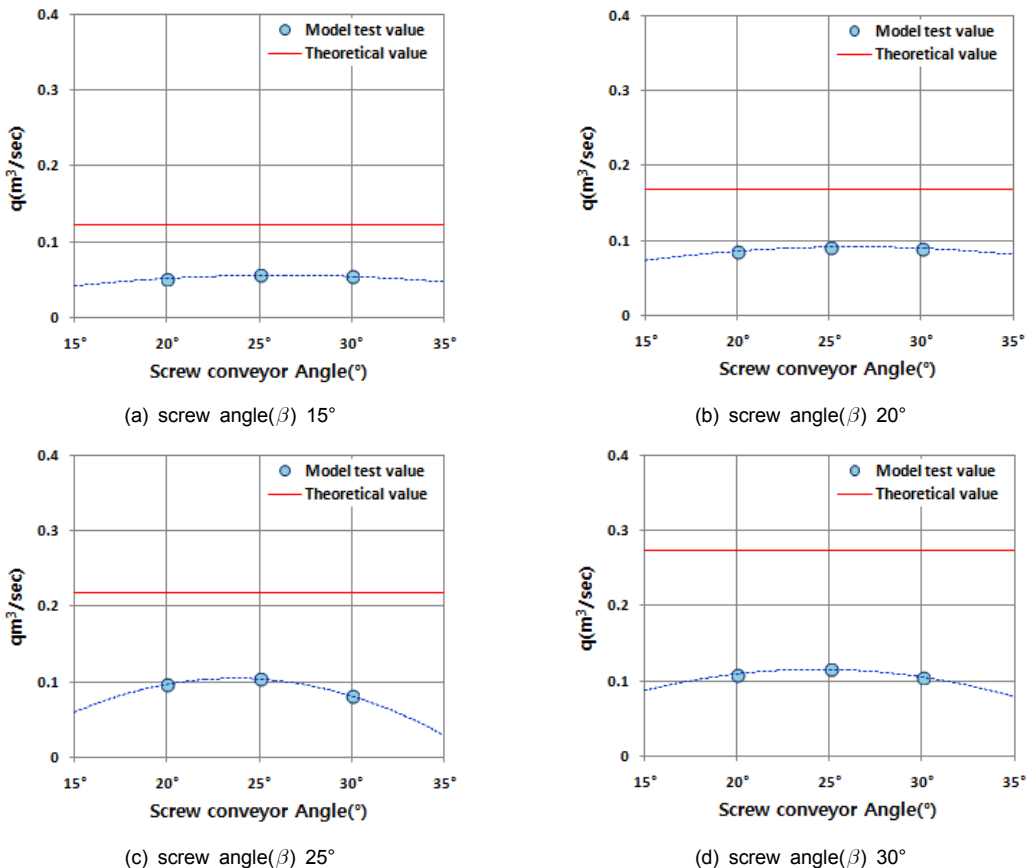


Fig. 5. Shaft type

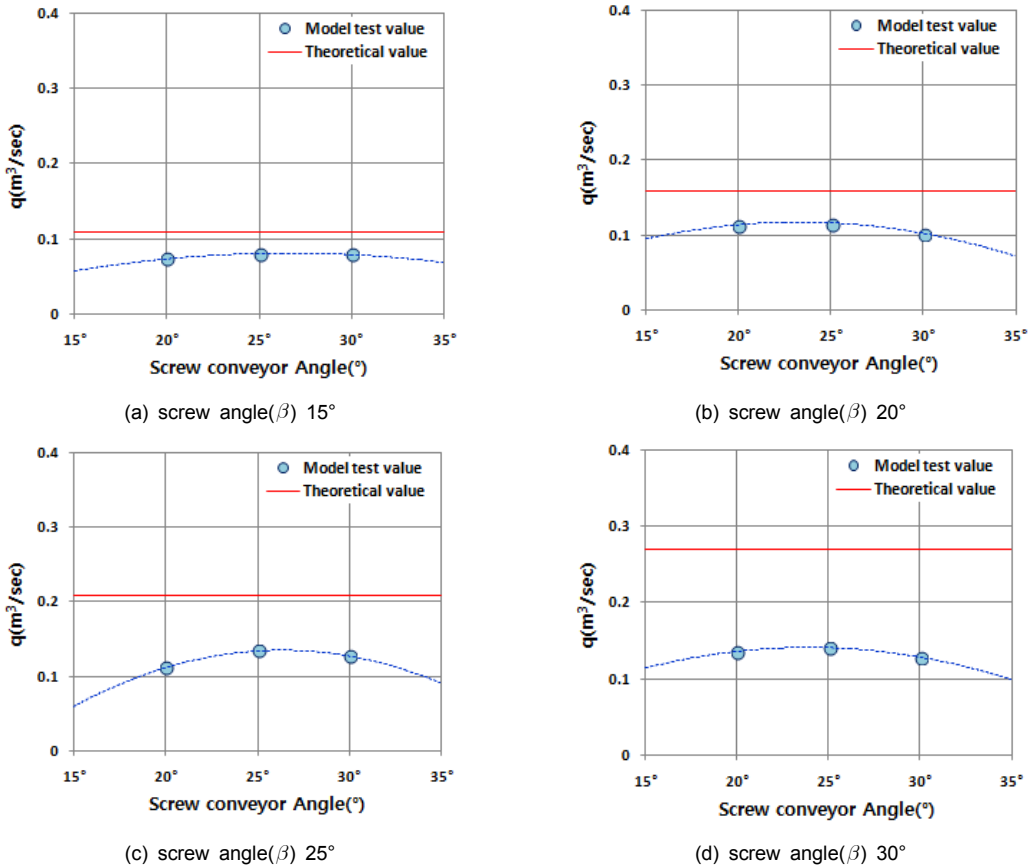


Fig. 6. Ribbon type

증가하였다.

본 논문에서는 screw 각도(β)가 증가할수록 단위시간당 배토량이 증가하는 것으로 동일한 경향이 나타났다. screw conveyor의 각도(α) 25° 일 때 최대 배토량이 나타났으며, 이는 Scale factor로 인하여 기존 연구 결과와 다소 차이는 있으나 최적의 screw conveyor 각도(α)가 도출이 되었다.

따라서 향후 최적의 screw 각도(β)에 대한 추가적인 연구와 현장 screw conveyor 설계 시 기초 자료로서 Scale factor을 고려해야 한다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 shield TBM의 버력 배토장비 screw

conveyor의 주요 Parameter인 screw 형태, screw conveyor 각도(α), screw 각도(β)에 따른 최적 버력 배토효율에 대해 판단하기 위해 축소모형시험을 실시하고 기존 이론식과 비교 검토를 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 샤프트식 screw와 리본식 screw의 단위시간당 배토량을 측정된 결과 screw 각도(β)가 증가할수록 단위시간당 배토량이 증가하였으며, 단위시간당 최대 배토량은 screw conveyor 각도(α) 25°일 때 측정되었다.
2. 기존 이론식과 비교 분석 결과, 기존 이론식은 screw conveyor 각도(α)를 고려하지 않았으며, 본 논문은 screw conveyor 각도(α)를 고려하여 최적

screw conveyor 각도(α)를 산정하였다. 향후 점토 지반에 대한 새로운 이론식 도출을 위해 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

3. 사질토 지반에 대한 배토량 이론식과 비교분석한 결과, 측정된 단위시간당 배토량은 작게 나타났다. 이는 기존 이론식과 모형시험의 지반이 상이하여 나타난 것으로 판단된다.
4. 점토지반에서의 screw 형태에 따른 단위시간당 배토량을 비교 분석한 결과 리본식 screw의 단위시간당 배토량이 샤프트식 screw보다 배토량이 많은 것으로 나타났으며, 따라서 screw 선정 시 지반 상태에 따라 적절한 screw 형태의 선정이 필요하다고 판단된다.
5. 김상환(2011)과 비교 분석을 통해 최적의 screw conveyor 각도(α) 25°를 도출하였고, screw 형태 및 각도에 따라 단위시간당 배토량을 측정하였으며, Scale factor로 인해 기존 연구와의 결과에서 다소 차이가 나타나는 것을 확인하였다.

본 연구는 shield TBM의 버력 배토장비인 screw conveyor의 주요 Parameter에 따라 최적의 배토효율을 검증하기 위한 연구로서 버력 배토 시 screw 형태, screw conveyor 각도(α), screw 각도(β)가 배토효율에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 따라서 향후 screw conveyor의 기초 설계 기술 개발 시 screw conveyor의 Parameter요소에 대한 검토가 필요하며, 점토 지반 외에도 다양한 지반에 적용이 가능하도록 추가적인 연구가 지속적으로 이루어져야 한다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신 사업인 “TBM 핵심 설계·부품기술 및 TBM 터널의 최적 건설기술(과제번호 : 10기술혁신 E09) - 토사지반 커터헤드 설계요소 핵심기술 개발”의 일환으로 작성되었습니다.

References

1. Kim, S.H., Kim, J.D., Park, I.J. (2011), “An experimental study on screw conveyor system of EPB shield TBM”, Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 13, No. 6, pp. 519-530.
2. Kim, S.H., Oh, T.S., Park, S.H., Lee, C.Y., Park, J.K. (2014), “Development of simulation equipment system on EPB shield TMB hood operation”, Korean Tunnelling and Under ground Space Association, Vol. 16, No. 2, pp. 193-201.
3. Jang, K.G. (2008), “A study on Influence of the TBM Equipment Thrust on Segments during Excavation of Rockbed for Large-Diameter Shield Tunnel”, Yonsei University.
4. Korean Tunnelling and Underground Space Association (2008), “A series of Tunnel engineering 3 The mechanized tunneling techniques-Design”, CIR, pp. 27-32, 156.
5. Han, M.S., Kim, Y.J., Shin, I.J., Lee, Y.J., Shin, Y.S., Kim, S.H. (2013), “Simulation of shield TBM tunneling in soft ground by laboratory model test”, Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 15, No. 5, pp. 483-496.
6. Merritt, A.S., Mair, R.J. (2006), “Mechanics of tunnelling machine screw conveyor : model tests”, Geotechnique, Vol. 56, No. 9, pp. 605-615.
7. Merritt, A.S., Mair, R.J. (2008), “Mechanics of tunnelling machine screw conveyor : a theoretical model”, Geotechnique, Vol. 58, No. 2, pp. 79-94.
8. Roberts, A.W. (1999), “The influence of granular vortex motion on the volumetric performance of enclosed screw conveyors”, Powder Technology, pp. 56-67.
9. Bezuijen, A., Schamine'e, P.E.L. (2001), “Simulation of the EPB-Shield TBM in model tests with foam as additive”, Proceedings of Congress on Modern Tunnelling Science and Technology, pp. 935-940.
10. Daniele Peila, Claudio Oggeri and Raffaele vinai (2007), “Screw conveyor device for laboratory tests on conditioned soil for EPB tunneling operations”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental

- Engineering, Vol. 133, No. 12, pp. 1622-1625.
11. Owen, P.J, Cleary, P.W. (2009), "Prediction of screw conveyor performance using the Discrete Element Method (DEM)", Powder Technology, Vol. 193, No. 3, pp. 274-288.
 12. Raffaele Vinai, Claudio Oggeri and Daniele Peila (2008), "Soil conditioning of sand for EPB applications: A laboratory research", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 23, No. 3, pp. 308-317.
 13. MIGUEL ÁNGEL PEÑA DUARTE (2007), "Foam as a soil conditioner in tunnelling: physical and mechanical properties of conditioned sands", The University of Oxford.
 14. 社団法人 地盤工学会 (1997), "シールド工法の調査、設計から施工まで", 日本, pp. 145.