섀드TBM 추진시 세그먼트 두께영향에 대한 현장사례연구

김상환^{1*} · 김원경² · 이혜윤²

¹정회원, 호서대학교 토목공학과 교수

²비회원, 호서대학교 토목공학과 석사과정

Effect of Segment thickness during Shield TBM tunnelling in case study

Sang-Hwan Kim^{1*}, Won-Kyung Kim², Hye-Yoon Lee²

¹Professor, Department of Civil Engineering, Hoseo University

²Graduate student, Department of Civil Engineering, Hanseo University

ABSTRACT: This paper presents the effect of Segment thickness during Shield TBM tunnelling in case study. In order to perform this study, the ground condition developed in the investigation site are reviewed and analysed. It is also carried out the construction problems occurred in the site during Shield TBM tunnelling. Several Segments were broken partially during advance tunnel by jacking pressure. The data surveyed from site are analysed in order to investigate the cause of Segment break. The numerical and analytical evaluations are carried out to examine the effect of Segment behaviour. From the results, it is found that the main causes of Segment break may be the jacking system and Segment thickness. In addition, new jacking technique is suggested to install safely the Segment during advance tunnel by jacking.

Keywords: The effect of segment thickness, Failure reason of segment, Segment stability, Finite element method

초 록: 이 논문은 섀드TBM 추진시 잭킹 force에 의한 세그먼트 두께의 영향에 대한 현장사례연구이다. 이 연구를 위하여 조사 현장의 지반 특성에 대하여 분석하고 현장 조사 자료를 통한 섀드TBM공사시 문제점에 대하여 분석하였다. 실질적으로 잭킹에 의한 터널 추진시 세그먼트가 부분적으로 파손된 것으로 추측되었다. 이에 따라 세그먼트의 파손에 대하여 조사하였으며, 파손 원인에 대하여 다각적으로 수치 해석적 및 이론적으로 평가를 실시하였다. 결과로부터 파손의 주원인들은 잭킹 시스템과 세그먼트의 두께가 얇은데 있다는 것으로 추측되었다. 추가로 연구 결과를 근거로 향후 얇은 세그먼트의 안전한 설치를 위한 추진 잭킹 방법에 대하여서도 제안하였다.

주요어: 세그먼트두께의 영향, 세그먼트의 파손 원인, 세그먼트 안정성, 유한요소해석

1. 서 론

섀드TBM 터널공법은 특징적으로 다른 터널 공법에 비하여 굴진속도가 빠르고 비교적 안전하게 공사를 수행할 수 있는 장점이 있다. 또한 원형단면으로 불필요한 공간의 발생을 최소화 할 수 있다는 장점 때문에 최근에 터널공사에 적용되고 있다(장영국, 2008). 섀드TBM 기술에 있어서 세그먼트 설치의 때

우 중요한 공종이다. 따라서 세그먼트 설치 후 잭킹에 의한 섀드TBM 추진시 세그먼트의 안정성은 확보되어야 한다. 일반적으로 섀드TBM 시공 중 세그먼트 파손의 원인은 크게 굴착구간의 지질특성, 세그먼트 두께, 추진을 위한 잭킹력의 편심 작용, 세그먼트 설치 기능공의 조작미숙, 테이퍼를 이용한 세그먼트 조립 시 키(Key) 세그먼트의 위치, 암반상태에 따른 추진압의 초과 등을 들 수 있다(문상조, 장석부, 2000). 그러나 세그먼트 안정성 확보를 위한 섀드TBM 운전에 대한 연구는 미미한 상태이다. 따라서 연구는 실질적으로 섀드TBM 추진시 세그먼트의 파손이 발생한 실질적인 현장사례를 통하여 원인을 다각적으로 분석하고

***Corresponding author:** Sang-Hwan Kim
E-mail: kimsh@hoseo.edu

Received May 1, 2013; **Revised** May 13, 2013;
Accepted May 27, 2013

이 결과로부터 시공된 세그먼트의 구조적 안전성을 검증하는데 목적이 있다.

이 연구를 수행하기 위하여 사례현장의 지반상태와 시공현황을 분석하고 문제점을 파악한 후 현장조사를 실시하였다. 이 조사자료를 근거로 세그먼트의 파손 원인에 대하여 다각적으로 수치 해석적 및 이론적으로 평가를 실시하였다.

2. 쉴드TBM 설계현황

2.1 쉴드TBM 원설계 검토

시공 규모를 고려하여 최적단면을 선정하고 세그먼트 두께는 180 mm가 적용되었다. 특히 급곡선($R=90$ m)을 고려하여 Tail Void는 100 mm로 설계되었다. 본 연구에서 적용된 설계단면은 Fig. 1과 같다. 설계에서는 지하수위를 고려하여 설계에 반영하였으며 설계 하중은 자중, 암반이완하중, 수압 등을 적용하였다.

암반이완하중은 세그먼트의 상부에 작용하는 등분포 하중으로 하며, 그 크기는 Terzaghi에 의한 이완하중, RMR에 의한 이완하중을 이용하여 이완하중고를 산정하여 지반등급에 따라 해당되는 이완하중을 이용하여 해석을 실시하였다. 해석시 측압계수(K_0)는 0.5, 1.0, 1.5를 적용하여 가장 불리한 단면력에 대하여 설계되었다. 설계방법은 강도설계법으로 실시하였으며 지반은 스프링으로 모델링하였다. 하중조합에 있어서 Case1, 2의 연직하중의 경우 1.2를 적용하였으나 1.4를 적용함이 바람직하다. 또한 편심을 고려한 잭 추진, 뒷채움 주입압, 세그먼트 운반 · 조립 · 적치 시를 고려한 구조검토가 설계 시 반영되어야한다.

2.2 설계 세그먼트 제원 검토

과업구간에 적용된 세그먼트는 직선형(S-Type)과 곡선형(T-Type)으로 나누어져 있으며, 1Key + 4Block로 이루어져 있다. 세그먼트의 제원은 Table 1과 같다.

Fig. 1. Designed segment standard section

Table 1. Investigated each section of damaged Segment

Point No.	Horizontal Alignment	Segment Number of rings	Segment Number of rings damage	
			The time of jacking	The time of assemble
99+00~101+00	Straight	40	1	0
101+00~104+00	Curve	60	6	3
104+00~106+10	Curve	50	9	2
106+10~111+10	Curve	100	2	22
111+10~119+00	Curve	150	38	6
119+00~122+00	Curve	60	19	0

Table 2. Segment data

Items	Standard
Segment external diameter (mm)	φ 2,960
Segment inside diameter (mm)	φ 2,600
Segment thickness (mm)	180

Table 3. Construction section

Items	Section characteristic
Section 1	(Curve section) Segment destroyed on beginning excavation
Section 2	(Straight section) Segment destroyed on excavating section
Section 3	(Straight+Curve section) Be scheduled for excavation section

Fig. 2. Position of jacking & detail drawing

특히 적용된 지수방식은 세그먼트 외측에 수평창 지수재 1열로 시공하도록 하였으며, 볼트박스 타입으로 세그먼트를 서로 체결하도록 설계되었다. 지수재의 경우 2 mm 여유두께가 추가되어 조립 시 압축에 의한 지수효과를 향상시키도록 하였다. 그러나 지수재의 설치위치에 대하여서는 세그먼트 거동에 대한 위치의 적정성에 대한 상세한 검토가 요구되어진다.

세그먼트의 뒷채움 주입방식에 있어서는 1링의 굴진 완료마다 뒤채움 주입 및 충전처리를 시행하는 즉시주입방식으로 설계되어 있다. 그러나 실질적인 현장에 있어서는 작업조건에 의하여 정확시공을 하는 것은 어려움이 있는 것으로 조사되었다.

2.3 설계 추진방식과 실제추진현황 검토

본 연구에 적용된 쉘트TBM의 추진방식은 장비 측면부 암반에 지지하여 추력을 확보하는 Gripper와

세그먼트에 지지하는 Thrust jack으로 굴진하며 파쇄 대나 기타 이상지질대 통과 시 Gripper와 Thrust jack을 동시에 적용할 수 있도록 계획되어있다. 현장에서 적용된 추진제원을 요약 정리하면 Table 2과 같으며, 추진잭 위치 및 상세도는 Fig. 2과 같다.

3. 시공현황 분석

사례현장은 Table 3과 같이 굴진 시 세그먼트의 파손이 많이 발생하였던 1구간과 현재 굴진 진행 중이며, 파손이 발생한 2구간, 향후 굴진예정인 3구간으로 구분할 수 있다.

3.1 시공구간 세그먼트 파손현황

시공구간 세그먼트의 파손은 대부분 Fig. 3에 나타난 것과 같이 전반적으로 3개 부위에서 측점위치에

Fig. 3. Damaged part of segment

Fig. 4. Analysis Modeling

따라 유사하게 발생되었다. 특히 쉴드TBM 장비 Jamming 발생한 구간에서는 다른 구간 보다 큰 범위로 파손이 발생한 것으로 조사되었다.

본 연구에서는 보다 상세한 분석을 위하여 현장조사를 재실시하였으며 대표적으로 파손이 많이 발생한 곡선노선 중 일반구간과 Jamming 발생구간에 대하여 파손형태와 터널내공측정 결과를 검토하였다.

4. 세그먼트 라이닝의 안정성 검토

본 연구는 전력구 터널 세그먼트 라이닝 구조물에 대하여 설계 시 미반영한 추가적인 고려사항과 실측에 의한 손상상태를 반영하여 안정성에 대하여 Table 4와 같은 조건에서 검토를 실시하였다.

4.1 세그먼트 두께 검토

본 터널 구조물은 비배수 터널로서 내부시설의 유

지관리, 영구 구조물로서의 기능유지, 주변 지반의 변형방지를 목적으로 완전지수가 요구되어진다. 본 검토에서는 지하수위를 고려하여 설계에 반영하였으며 설계하중은 자중, 암반이완하중, 수압 등을 적용하였다. 암반이완하중은 세그먼트의 상부에 작용하는 등분포하중으로 하며, 이완하중고는 Terzaghi에 의한 이완하중, RMR에 의한 이완하중을 고려하였으나 원설계가 안전측으로 적용하여 그 크기를 동일하게 적용하였다. 다만 암반구간의 측압계수(K)는 원설계와는 다르게 탄성론($v/(1-v)$)에 근거하여 산정하였다. 본 연구에서는 강도 설계법을 적용하였으며 지반은 전체둘레를 스프링모델로 하여 MIDAS/Civil Ver. 2006을 이용하여 해석하였다. 해석에 이용된 세그먼트의 단면특성은 Table 4와 같다.

4.1.1 세그먼트 두께 해석 모델링

해석 모델링의 경우 Fig. 4와 같이 세그먼트의 단면을 모델링하였으며, 쉴드TBM 터널이 통과하는 암반

Table 4. Segment section property (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs in Korea, 2009, 日本土木學會, 2006)

Segment thickness	0.18 m	Strength of Rebar (f_y)	400 MPa
Strength of Concrete (f_{ck})	42 MPa	Concrete elastic modulus	31,314 MPa

Table 5. Loosening load height consideration of Terzaghi & RMR

Items	1.5 times of Terzaghi value	RMR		Applied value
		Unal (1983)	Bieniawski (1984)	
Weathered rock	8.1	2.2	2.2	8.1
Soft rock	8.0	1.7	1.2	8.0

Table 6. Modeling case

Items	Weight combination apply the value			
	Self weight	Verticality loosening load	Horizontality loosening load	Ground water pressure
Case1	1.20	1.40	1.60	1.60
Case2	1.20	1.40	0.80	1.60
Case3	0.90	0.90	1.60	1.60
Case4	1.00	1.00	1.00	1.00

Table 7. Weathered rock modeling result (Design section, $K_0=0.429$)

Member	Thickness (mm)	Usual		Plan moment $\pm M_n$	Plan shearing stress $\pm V_n$	Using steel reinforcement		Result
		Moment	Shearing stress			Main reinforcement	Shear reinforcement	
		kN·m	kN					
Outer	180	87.6	213.0	117.2	393.8	H16@100	H13@150	O.K
Inside	180	81.9	171.4	107.4	406.2	H16@125	H13@150	O.K

Table 8. Soft rock modeling result (Design section, $K_0=0.370$)

Member	Thickness (mm)	Usual		Plan moment $\pm M_n$	Plan shearing stress $\pm V_n$	Using steel reinforcement		Result
		Moment	Shearing stress			Main reinforcement	Shear reinforcement	
		kN·m	kN					
Outer	180	35.7	175.6	105.9	409.1	H16@100	H13@150	O.K
Inside	180	42.8	168.2	111.1	400.7	H16@125	H13@150	O.K

Table 9. Soft rock modeling result (After damaged section, $K_0=0.370$)

Member	Thickness (mm)	Usual		Plan moment $\pm M_n$	Plan shearing stress $\pm V_n$	Using steel reinforcement		Result
		Moment	Shearing stress			Main reinforcement	Shear reinforcement	
		kN·m	kN					
Outer	150	35.7	175.2	73.4	320.7	H16@100	H13@150	O.K
Inside	150	42.8	168.1	70.6	313.1	H16@125	H13@150	O.K
Broken section	150	10.1	65.3	39.9	None	H16@100	H13@150	O.K

구간 중 풍화암 구간의 이완하중고는 Terzaghi식과 RMR을 고려하여 Terzaghi 이완하중 값의 1.5배를 적용하여 이완하중고를 산정하였으며, Table 5와 같다. 해석 모델링 하중 Case는 다음 Table 6과 같다.

4.1.2 세그먼트 두께 해석 모델링 결과

풍화암, 연암의 세그먼트 두께 해석 모델링 결과는 다음 Table 7, 8, 9와 같다.

4.2 추진압에 따른 세그먼트 거동 검토

본 연구는 추진압시 세그먼트의 파손이 많이 발생한 곡선부에 대하여 굴진시 작용하는 추력에 의한 세그먼트의 거동을 3차원 유한요소법에 의해 검토된 것이다. 세그먼트 추력은 현장과 동일하게 적용하였으며, 곡선부의 곡률은 실제 설계도를 참고하여 적용하였다. 다음과 같은 지반조건, 하중조건, 시공방법

Fig. 5. Analysis Modeling

및 시공순서에 따라 MIDAS GTS 해석프로그램을 이용하여 검토를 수행하였다. 특히 터널은 20 m 직선 구간을 시작으로 40 m의 곡선구간 다시 30 m의 직선 구간으로 총 90 m를 Fig. 5과 같이 모델링 하였다.

Gap 그라우팅 두께는 20 cm (Interface 효과포함), 세그먼트 두께는 18 cm, 지반등급은 풍화암과 연암의

Table 10. Struct properties

Layer	Unit weight (kN/m ³)	Deformation modulus (MPa)	Cohesion (kPa)	Angle of internal friction (°)	Poisson's ratio
Segment	25.5	30,591.48	-	-	0.3

Table 11. Ground properties

Layer	Unit weight (kN/m ³)	Deformation modulus (MPa)	Cohesion (kPa)	Angle of internal friction (°)	Poisson's ratio
Weathered rock	20	400	30	32	0.30
Soft rock	25.5	2,039.43	510	35	0.27

Table 12. Grouting properties

Layer	Unit weight (kN/m ³)	Deformation modulus (MPa)	Cohesion (kPa)	Angle of internal friction (°)	Poisson's ratio
Before reinforcement	19	3	-	-	0.31
After reinforcement	23	21,000	-	-	0.20

Fig. 6. Modeling procedure

중간값으로 하여 굴진장은 1 m로 하였으며, 세그먼트 시공순서를 고려하여 굴착 후 9단계로 해석하였다.

4.2.1 적용 물성치

구조체, 지반, 그라우팅 물성치는 Table 10, 11, 12와 같으며, 현장과 동일하게 적용하였다.

4.2.2 해석 순서

해석순서에 대하여 나타내면 Fig. 6와 같다.

Fig. 7의 해석결과와 예로서 상기 검토를 통하여 다음과 같은 결과를 도출하였다. 본 연구는 정량적으로 현장과 일치할 수는 없지만 곡선부에 추진압을 적용할 때 곡선부 안쪽의 세그먼트에 응력이 더 많이 발생됨을 알 수 있다. 또한 세그먼트 설치 후 즉시 그라우팅이 어려워 지반과 일체화되지 않았을 것으로

판단되며, 이에 따라 곡선부에서 추진압을 가할 때 세그먼트의 이음부에 파손이 야기될 수 있으며 불규칙적인 변위 발생으로 부분적인 응력 집중에 의하여 파손이 더 많이 발생된 것으로 판단된다.

5. 추진압에 대한 라이닝(세그먼트) 안정성 검토

5.1 세그먼트 수와 두께의 적정성

일반적으로 세그먼트 수와 두께에 대한 적정성 평가는 일반적으로 규정된 기준은 없지만 시공성과 경제성, 효율 등을 고려하여 Fig. 8과 같이 제시된 경험적인 측면 분석으로 예측할 수 있다.

이러한 자료 분석 결과 본 과업구간의 경우 터널내

Fig. 7. Example of Right Springline displacement modeling result (Example)

Fig. 8. Segment thickness & number (Vittorio et al, 2007)

경 2.6 m 경우 세그먼트 두께는 20 cm 이상으로 계획하는 것이 적절하였다고 판단된다. 따라서 현재 18 cm로 시공되고 있는 본 과업구간에 대하여서 향후 세그먼트의 두께를 변경하는 방안과 추진압에 대한 철저한 분석을 통한 세그먼트의 손상이 없도록 정밀 시공이 요구된다. 또한 1링에 대한 세그먼트의 수에 대해 현재 설계된 5개는 적절하다고 판단된다.

5.2 Thrust Jack의 추진력에 대한 세그먼트의 안정성 검토

본 연구에서는 추진압에 따른 세그먼트의 파손여부를 검증하기 위하여 안정성 검토를 실시였다. 검토 시 적용된 Thrust Jack의 추진제원은 실질적으로 현장 조건을 이용하였으며, 추진시 세그먼트에 가해지는 압력전달 메커니즘을 나타내면 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다.

상기 압력전달 메커니즘에서 보여주듯이 지수재의 영향으로 Jacking Pad의 회전으로 세그먼트에 가해지는 압력은 균등분포가 되기보다는 편심 발생으로 세그먼트 모서리가 파손되었을 것으로 추측된다. 이러한 현상을 정량적으로 분석하기 위하여 Conventional rigid method와 유한요소방법으로 검토를 실시하였다.

5.2.1 Conventional rigid method

이 방법은 추진압이 세그먼트에 균등하게 작용되고 오직 편심에 의한 압력분포를 검토한 것이다. 이 경우 일반적으로 다음과 같은 하중 분포식을 이용하여 검토한다.

$$q = \frac{F}{A} \pm \frac{M_y x}{I_y} \pm \frac{M_x y}{I_x} \quad (1)$$

상기식으로 부터 세그먼트 양끝단에 가해지는 최대, 최소압력, $q_{\max}$ 와 $q_{\min}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$q_{\max/\min} = \frac{F}{A} \pm \frac{M_y x}{I_y} \quad (2)$$

x축에 대한 실질적으로 야기되는 2 cm내외의 편심을 고려하고 계획된 최대 추진압 작용 시 계산결과 $q_{\max}=15\sim16$ MPa, $q_{\min}=12\sim14$ MPa로 예측된다. 이결과로부터 최대압력이 가해지는 부분에 대하여서는 세그먼트의 허용압축강도에 도달하는 수준이며, 실질적인 경우는 일부구간에 추진압을 가할 때 편심이 더 많이 발생될 것으로 예측되기 때문에 이에 따라 세그먼트의 허용 압축강도 이상의 추진압이 가해질 가능성이 있을 것으로 판단된다.

Fig. 9. Pressure transition mechanism of Thrust Jack & Segment

Fig. 10. Finite element method modeling result

5.2.2 유한요소방법

이 해석의 Plane Strain 조건에서 수행된 결과를 정리하여 나타내면 Fig. 10와 같다.

상기와 같이 유한요소방법에 의한 검토결과는 보다 확실하게 세그먼트 모서리 부분의 응력이 집중되고 이에 따른 변형이 발생하여 결국은 파손되는 메커니즘 양상을 보여주고 있다. 그러나 세그먼트간 연결부를 고려한다면 실질적으로는 응력집중이 더 클 가능성을 배제할 수 없을 것이다. 따라서 향후 추진압 작용 시 패드로 세그먼트에 전달되는 하중이 등분포하게 작용되도록 유도하고 편심을 최소로 할 수 있는 방안으로 개선되어야 할 것으로 판단된다.

6. 결론 및 제언

쉐드TBM 구간에서 발생된 세그먼트의 파손에 대하여 검토하였다. 본 검토를 위하여 현장조사를 실시하고 파손 현황에 대한 시공 현황을 분석하였다. 또한 세그먼트의 안정성에 대하여 다각적으로 검토하였다. 세그먼트 안정성 검토는 지반과 세그먼트의 상호거동 검토, 세그먼트 단면의 구조안정성 검토, 추진압에 의한 세그먼트거동 등으로 구분하여 실시하였으며, 추진압에 의한 세그먼트의 국부안정성검토 실시하였다. 이들 결과로부터 세그먼트의 파손원인을 규명하고 시공된 파손부 보수보강공법에 대한 의견을 제시하였다. 상기와 같이 통합적인 검토에 의한 결론은

다음과 같다.

1. 가장 근본적인 세그먼트의 파손의 원인은 굴착시 세그먼트에 추진압을 가할 때 추진압력 시스템과 세그먼트두께와 지수재 설치위치 등 접촉단면의 특성상 상호 중심축이 일치하지 않아 편심발생으로 터널 내측 세그먼트 모서리에 응력이 집중되었던 것으로 판단된다.
2. 파손이 발생한 세그먼트 라이닝에 대하여서는 정량적인 해석결과에 의하면 허용기준내에서 거동하는 것으로 예측되어 구조적인 안정성에는 문제가 없는 것으로 판단된다. 다만 파손된 부분에서는 장기적인 안전을 위하여 철저한 보수가 요구된다.
3. 향후 파손방지를 위하여서는 추진압에 의한 편심발생을 최소화 시킬 수 있는 Jacking Pad의 개선과 가압시스템 등이 개선되어야 할 것이며, 특히, 라이닝 세그먼트의 두께를 20 cm이상으로 증가시켜 접촉단면의 증가 뿐만 아니라 구조적 안정성도 증대시키는 방안도 고려해 보아야 할 것이다.
4. 세그먼트의 두께에 대하여서는 이에 따른 단면 변화에 따른 지수재의 설치위치와 굴진 시 추진압에 따른 세그먼트의 거동, 배면 그라우팅방법, 그리고 이에 따른 장비의 특성 등을 충분히 고려하여 결정 되어야 할 것으로 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.

참고문헌

1. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs in Korea. (2009), “Standard specifications for concrete.”
2. Moon, S.J., Jang, S.B. (2000), “Water proof of shield segment tunnel” Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 2, No. 1, pp. 139-149.
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. Bieniawski, Z.T. (1984), “Rock mechanics design in mining and tunnelling” pp. 97-133.
5. Vittorio Guglielmetti, Piergiorgio Grasso, Ashraf Mahtab, Shulin Xu. (2007), “Mechanized tunnelling in urban areas : Design methodology and construction control” pp. 197.
6. Unal, E. (1983), “Design guidelines and roof control standards for coal mine roofs” pp. 355.
7. Japan Society of Civil Engineers. (2006), “Japan standard specifications for shield tunnel.”