경계조건 변화에 의해 발생한 축력을 고려한 세그먼트 라이닝의 균열하중 분석

이규필¹ · 배규진² · 장수호³ · 강태성⁴ · 최순욱^{5*}

¹정회원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 수석연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 선임연구위원

³정회원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 연구위원

⁴비회원, 삼표건설 연구개발팀 과장

⁵정회원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 전임연구원

Analysis of segment lining cracking load considering axial force by varying boundary condition

Gyu-Phil Lee¹, Gyu-Jin Bae², Tae-Sung Kang³, Soo-Ho Chang⁴, Soon-wook Choi^{5*}

¹Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Senior Researcher

²Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Senior Research Fellow

³Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Research Fellow

⁴SAMPYO Construction & Engineering co. Ltd., R&D Department, Manager

⁵Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Research Specialist

ABSTRACT: In the design of tunnel segment structure, axial and moment forces are considered as significant forces. Since axial force is much greater than moment force, the whole section of segment remains in compression. Therefore crack width can be reduced. But the axial force is not considered in criteria for serviceability check. This fact leads service condition more severe compared to ultimate condition and makes the required steel reinforcement increase to meet the serviceability criteria. In this study, the effect of axial force on serviceability of tunnel segment is evaluated, experimentally and analytically. Mock-up tests on segments with actual size were performed and investigated in terms of initial crack resistance. The evaluation proves that more comprehensive design could be achieved when the axial force is considered in the procedure for the serviceability check in design of tunnel segment.

Keywords: Shield tunnel, Segment, Axial force, Cracking load, Cracking moment

초 록: 세그먼트 설계시, 축력과 휨모멘트가 주로 고려되는 하중이다. 두개의 하중에서 축력이 모멘트 보다 상대적으로 매우 크기 때문에 전단면이 압축상태에 있으며, 이는 균열 폭을 줄이는 효과가 있다. 그러나 콘크리트 구조물의 사용성 검토에서 축력은 고려하지 않고 있기 때문에 설계는 사용성에 지배되고, 사용성을 만족시키기 위하여 소요 철근량을 증가시키게 된다. 본 논문에서는 축력이 세그먼트의 사용성에 미치는 영향을 시험과 단면해석을 통하여 분석하였다. 세그먼트에 대한 시험을 수행하였으며, 초기균열저항성능에 대하여 고찰하였다. 분석결과 사용성 분석에서 축력을 고려함으로써 더욱 합리적인 설계가 가능한 것을 확인할 수 있었다

주요어: 실드터널, 세그먼트, 축력, 균열하중, 균열 모멘트

1. 서 론

세그먼트 라이닝(segment lining)은 재질에 따라 RC 세그먼트와 강재 세그먼트 등으로 구분된다. 이 가운데 RC 세그먼트는 공장이나 현장에서 미리 제작된 프리캐스트(precast) 세그먼트를 조립하여 설치되

*Corresponding author: Soon-wook Choi
E-mail: soonugi@kict.re.kr

Received February 26, 2014; Revised March 6, 2014;
Accepted March 12, 2014

는 터널 라이닝으로서, 쉘드터널에서 필수적으로 사용되는 구조체이다. 특히, 쉘드터널 세그먼트는 쉘드 TBM의 추진을 위한 반력지지 구조물로서의 역할과 공사 중의 안정성 확보는 물론이고 영구적인 터널 라이닝의 역할도 하게 된다(Lee et al., 2012).

세그먼트 라이닝과 같은 철근콘크리트 구조물의 각 부재에 대한 설계 및 부재 성능은 전체 구조물에서 분리된 단독 부재로서 그 특성이 파악되고 있다(Lee et al., 2013(a)).

그러나 쉘드터널 시공시에는 수개의 세그먼트 라이닝을 연결하여 하나의 원형 구조물을 완성한다. 따라서 세그먼트 라이닝은 시공 후 단독 부재로 거동하지 않으며, 연결된 세그먼트에 의해 서로 변형이 구속될 뿐만 아니라, 원형 구조물의 특성으로 인하여 외부 하중 재하시 이를 휨과 축력으로 지지하는 특성을 갖는다.

일반적인 철근콘크리트 구조물에서도 실제 부재의 거동은 구조체에서 분리된 단독 부재로서의 거동과는 상이하다고 보고되고 있으며(Desayi. p. and Kulkarni. A. B., 1997; Chensheng. O. and Wimal. S., 1987), 변형구속에 의해 발생하는 축력은 휨부재의 강성, 변형성능 및 균열형상 등에 크게 영향을 미친다(Yang et al., 1997).

그러나, 세그먼트 라이닝의 사용성 검토시 국내의 균열에 대한 기준은 콘크리트구조기준(2012) 상의 보 및 1방향 슬래브의 휨 철근 배치에 관한 규정을 따르고 있다.

이는 세그먼트 라이닝의 균열 검토시 축력의 영향을 무시하고, 콘크리트구조기준에 제시된 휨 부재의 주철근 간격제한 규정을 적용함으로써, 세그먼트 라이닝의 주철근량이 균열 검토 조건에 지배되는 경향이 발생된다. 세그먼트 라이닝이 축력과 휨을 동시에 받는 부재로 전단면 압축상태일 경우 균열이 발생하지 않는 점을 고려할 때, 불합리한 설계기준의 적용으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 축력을 고려한 균열하중 검

토를 통한 세그먼트 라이닝의 합리적인 설계 검토를 위하여, 축력 영향에 의한 하중-균열발생 상관관계 분석을 위하여 세그먼트 라이닝 실태형 하중재하시험을 수행하였다. 하중재하시 세그먼트 라이닝의 경계 조건을 힌자-롤러 및 힌자-힌지로 변화시켜 축력발생 조건을 상이하게 유도하였다.

2. 시험체 제작 및 시험방법

2.1 세그먼트 시험체 제작

본 연구에서는 ○○현장에서 사용된 외경 4.2 m, 길이 2,403 mm, 폭 900 mm, 두께 200 mm인 세그먼트 라이닝의 A타입 세그먼트를 실험 재하시험 위한 시험체로 제작하였다(Fig. 1).

시험체 제작시 사용된 재료는 28일 재령 일축압축 강도 45 MPa의 콘크리트와 공칭직경 13 mm, 설계항복 강도가 500 MPa인 철근(SD 500)을 주철근으로 활용하였다. 인장축 주철근은 77~160 mm의 배근간격으로 총 8개(사용철근량 A_s : 933.6 mm²)를 배근하였다(Fig. 2, Table 1).

Fig. 1. Dimension and shape of specimen (unit: mm)

Table 1. Specimen preparation condition

Con'c uniaxial compressive strength	Rebar (SD 500)	
	arrangement	As
45MPa	D13@94~155 (8EA)	933.6 mm ²

Fig. 2. Rebar arrangement of specimen (unit: mm)

Fig. 3. Installation location of strain gauge

Fig. 4. General view of strain gauge installation

Fig. 5. Panoramic view of bending test

Fig. 6. Hinge boundary condition

하중 재하시험시 세그먼트 내부에 위치한 철근의 거동을 계측하기 위하여, 인장측 주철근에 총 20개의 변형률 게이지를 설치하였다.

2.2 시험방법

본 연구에서는 세그먼트 실물 휨시험시 시험체 상부에 하중재하를 위하여 재하 시스템의 중앙부에 설치된 유압 서보제어 액츄에이터(최대 재하용량: 100 톤, 최대 스트로크: 300 mm)를 사용하였다. 액츄에이터 하부에는 지간 800 mm의 2개의 선하중 재하판 부착 후 4점 휨시험을 실시하였다(Fig 5).

시험체 지점부 경계조건은 하중재하 시험체 중앙부에 발생축력을 최소화하기 위한 롤러-힌지 지점부 경계조건과 축력 발생을 유도하기 위한 힌지-힌지 지점부 경계조건으로 설정하였다.

롤러 지점부는 Fig 5에서 보이는 바와 같이 횡방향 방향성을 유지하기 위한 가이드 베이스와 시험체 및 재하하중 지지를 위한 롤러베이스로 구성하였으며, 힌지 지점부는 Fig. 6과 같이 수평방향 변위를 제어하도록 구성하였다. 수평방향 변위제어를 위한 힌지 지점부는 최대 수직하중 500 kN을 지지할 수 있도록 제작하였으며, 시험시 안전성 확보를 위하여 재하하중은 최대 약 450 kN으로 제한하였다.

하중재하 시험은 서보제어에 의한 변위제어 방식으로 시험을 실시하였으며, 변위제어속도는 재하점을 기준으로 2 mm/min으로 설정하였다. 또한 철근에 설치된 총 20개의 변형률게이지들로부터 얻어지는 변형률 자료는 0.1초당 1개씩 획득하였다.

Fig 5에서 보이는 바와 같이 세그먼트 시험체 하부

Fig. 7. Modelling for numerical analysis

에 하중-변위관계 분석을 위하여 변위계 및 영상처리 기법을 이용한 재하하중 단계별 균열측정용 사진기를 설치하였다. 영상처리기법에 의한 균열 측정은 0.1 mm 단위의 균열 폭을 측정하였다(Lee et al., 2013(b)).

3. 수치해석을 통한 경계조건 변화에 따른 축력 분석

본 연구에서는 시험체 지점부 경계조건은 하중재하시 시험체 중앙부에 발생축력을 최소화하기 위한 롤러-힌지 지점부 경계조건과 축력 발생을 유도하기 위한 힌지-힌지 지점부 경계조건으로 설정하였다.

경계조건 변화에 따른 시험체에 발생하는 축력의 크기 및 분포 등을 분석을 위하여, 시험조건과 동일한 경계조건 및 10 kN 하중재하 조건에 대한 수치해석을 수행하였으며, 세그먼트는 빔모델(Beam model)로 모사하였다(Fig. 7).

수치해석결과 경계조건 변화에 따라 세그먼트에 발생하는 축력의 크기 및 분포가 상이한 것으로 나타났다(Fig. 8).

(a) roller-hinge

(b) hinge-hinge

Fig. 8. Axial force diagram

10 kN 하중재하 조건에 대한 수치해석결과 롤러-힌지 경계조건인 경우 시험체 중심선 부분에서는 발생하는 축력은 0.29 kN가 발생하는 것으로 나타났으며, 힌지-힌지 경계조건인 경우 시험체 중심선 부분에서 발생하는 축력은 20.2 kN가 발생하는 것으로 나타났다(Fig. 8).

경계조건이 힌지-힌지인 경우 세그먼트에 발생하는 축력은 롤러-힌지 경계조건 대비 약 68.7배 이상 크게 발생하는 것으로 나타났으며, 따라서 경계조건 변화를 통한 축력의 영향 분석 및 이를 통한 세그먼트의 균열하중 분석을 위한 경계조건 선정은 합리적인 것으로 판단된다.

4. 시험결과 분석

4.1 경계조건 변화에 따른 균열발생

롤러-힌지 경계조건에 대한 시험결과 19.4 kN 하중재하시 시험체 중앙부에 0.1 mm 폭의 초기균열이 발생하였으며(Table 2), Fig. 9(a)에서 보이는 바와 같이 초기균열은 재하하중이 증가함에 따라 폭 0.2 mm 균열이 시험체 전면에 걸쳐 성장하였다. 재하하중 255.4 kN에서 시험체가 파괴되었으며(Fig. 10), 시험체 파괴시 발생한 균열의 최대 폭은 약 3.0 mm 인 것으로 나타났다.

힌지-힌지 경계조건에 대한 시험결과 19.4 kN 하중재하시 시험체에 균열이 발생하지 않았으며, Fig. 9(b)에서 보이는 바와 같이 52.5 kN 하중재하시 롤러-힌지 경계조건 시험결과 나타난 초기균열 패턴과 유사한 균열이 발생하였다(Table 2). 경계조건 변화 및 이로 인하여 시험체 내부에 발생하는 축력에 의한 영향으

Table 2. Cracking and failure load

boundary condition	cracking load	load at failure
roller-hinge	19.4 kN	255.4 kN
hinge-hinge	52.5 kN	-

로 균열하중은 약 2.7배 증가하는 것으로 나타났다.
 한자-힌지 경계조건에 시험시 재하한 최대 하중은 456 kN 이었으며, 이 때 발생한 균열의 최대 폭은 1.7 mm 인 것으로 나타났다.

경계조건이 롤러-힌지인 경우 210.2 kN 하중재하시 폭 1.7 mm의 균열이 발생하는 것으로 나타났다 (Fig. 11).

Fig. 9. Crack pattern by image process

Fig. 10. Specimens fracture (boundary condition: roller-hinge)

Fig. 11. Crack pattern at 210.2 kN (max. crack width: 1.7 mm, boundary condition: roller-hinge)

4.2 경계조건 변화에 따른 변형을 계속결과

본 연구에서는 경계조건 변화에 의해 시험체 내부에 발생하는 축력변화 및 이로 인하여 발생하는 균열하중관계를 분석하였다.

롤라-힌지 및 힌지-힌지 경계조건 모두 균열하중은 하중-변형을 관계곡선상 선형구간인 탄성영역 범위 내에 있는 것으로 나타났다(Fig. 12).

롤라-힌지 경계조건에 대한 시험결과 균열하중 19.4 kN 재하시 시험체 중심선(center line) 위치의 인장철근에 발생한 변형률은 23.26×10^{-6} 이며, 힌지-힌지 경계조건인 경우 균열하중 52.5 kN 재하시 시험체 중심선(center line) 위치의 인장철근에 발생한 변형률은 67.88×10^{-6} 인 것으로 나타났다(Table 3).

Table 3과 같이 각 경계조건별 균열하중 발생시 인장철근에 발생하는 최대 변형률을 Lee et al. (2010)의 연구결과를 토대로 시험체 중심선에 발생하는 휨모멘트를 산정하였다.

휨 모멘트 산정시 시험체 하부에 설치된 주철근은 Fig. 2~3 및 Fig. 13에서 보이는 바와 같이 세그먼트 조립을 위한 볼트박스의 영향으로 2개의 주철근이 절단되므로, 총 6개의 주철근이 인장철근으로 작용하는 것으로 산정하였다.

상기와 같은 조건에 대하여 균열 모멘트를 산정하면 시험체 중심선에 발생하는 균열 모멘트는 롤라-힌지 경계조건의 경우 15.1 kN·m, 힌지-힌지 경계조건의 경우 44.1 kN·m인 것으로 나타났다.

Fig. 12. Load-strain curve

Table 3. Test result summary

Boundary condition	Cracking load	Tensile strain at cracking load
roller-hinge	19.4 kN	23.26×10^{-6}
hinge-hinge	52.5 kN	67.88×10^{-6}

따라서 경계조건 변화 및 이로 인하여 시험체 내부에 발생하는 축력에 의한 영향으로 균열하중 재하조건에서 발생하는 균열 모멘트는 약 2.9배 증가하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 축력을 고려한 균열하중 검토를 통한 세그먼트 라이닝의 합리적인 설계 검토를 위하여, 축력 영향에 의한 하중-균열발생 상관관계 분석을 위하여 세그먼트 라이닝 실험대형 하중재하시험을 수행

Fig. 13. Main reinforcement cutting conditions

하였으며, 시험결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 롤라-힌지 경계조건의 경우 19.4 kN 하중재하시 시험체 중앙부에 0.1 mm 폭의 초기균열이 발생하였으며, 힌자-힌지 경계조건의 경우 52.5 kN 하중재하시 시험체 중앙부에 0.1 mm 폭의 초기균열이 발생하였다. 또한 균열하중 재하시 계측된 변형률로부터 시험체에 발생하는 균열 모멘트는 롤라-힌지 경계조건의 경우 15.1 kN·m, 힌자-힌지 경계조건의 경우 44.1 kN·m인 것으로 나타났다.
2. 이는 수치해석 결과에서 보이는 바와 같이 롤라-힌지 경계조건에서 힌자-힌지 경계조건으로 변화하는 경우 하중재하시 시험체 내부에 축력이 발생하게 되며, 이렇게 발생한 축력이 균열발생을 제어하기 때문에 균열하중 및 균열 모멘트가 각각 2.7배 2.9배 증가하는 것으로 판단된다.
3. 쉴드터널 시공시에는 수개의 세그먼트 라이닝을 연결하여 하나의 원형 구조물을 완성하며, 연결된 세그먼트에 의해 서로 변형이 구속될 뿐만 아니라, 원형 구조물의 특성으로 인하여 외부 하중 재하시 이를 휨과 축력으로 지지하는 특성을 갖는다. 따라서 축력을 고려한 세그먼트 라이닝의 균열에 대한 사용성 검토를 수행하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.
4. TBM 터널 세그먼트 라이닝에서 축력과 휨모멘트를 함께 고려해 균열을 검토하는 것이 세그먼트 라이닝의 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업인 “TBM 핵심 설계부품기술 및 TBM 터널의 최적 건설기술(과제번호: 10기술혁신E091) - 2세부과제 : 고성능 세그먼트 라이닝의 개발”의 일환으로 작성되었습니다.

References

1. Lee, G.P., Bae, G.J., Moon, D.Y., Kang, T.S., Chang, S.H. (2013a), “Evaluation of steel fiber reinforcement effect in segment lining by full scale bending test”, Journal of the Korean Tunnelling Association, Vol. 15, No. 3, pp. 215-223.
2. Lee, G.P., Bae, G.J., Chang, S.H., Choi, S.W., Kang, T.S. (2013b), “Crack control effect by steel fiber reinforcement to segment lining”, Korean Tunnelling Association 2013 Fall Symposium, pp. 97-100.
3. Lee, G.P., Park, Y.T., Choi, S.W., Chang, S.H., Bae, G.J., Kang, T.S., Lee, J.S. (2012), “An experimental study on mechanical behavior of shield segment with High-strength concrete and High-tension rebar”, Journal of the Korean Tunnelling Association, Vol. 14, No. 3, pp. 215-230.
4. Lee, G.P., Heang, J.H., Shin, H.S., Hong, S.G. (2010), “Mechanical behaviour of waterway culvert structure assembled by precast segments”, Journal of the Korean Tunnelling Association, Vol. 12, No. 2, pp. 193-200.
5. Yang, E.I., Kim, J.K., Yi, S.T., Morita Shiro, (1997), “The effect of axial force on the behavior and average crack spacing of reinforced concrete flexural member”, Journal of Korea Concrete Institute, Vol. 9, No. 4, pp. 207-214.
6. Desayi. p., Kulkarni. A.B. (1997), “Load-deflection of restrained R/C slabs”, Journal of the Structural Division, Vol. 103, No. 2, pp. 405-419.
7. Chensheng. O., Wimal. S. (1987), “RC rectangular slabs with edge restraints”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 113, No. 11, pp. 2146-2165.