

# 실대형 하중재하 시험 및 현장계측을 통한 실드터널 세그먼트 안정성 분석

이규필<sup>1\*</sup> · 장수호<sup>2</sup>

<sup>1</sup>정회원, 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 수석연구원

<sup>2</sup>정회원, 한국건설기술연구원 건설산업진흥본부 선임연구위원

## Stability analysis of shield tunnel segment lining by field measurement and full scale bending test

Gyu-Phil Lee<sup>1\*</sup> · Soo-Ho Chang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Senior Researcher, Department of Infrastructure Safety Research, KICT

<sup>2</sup>Senior Research Fellow, Construction Industry Promotion Department, KICT

\*Corresponding Author : Gyu-Phil Lee, freely@kict.re.kr

### Abstract

The shield tunnel was mostly applied to cable tunnel with a diameter of 3~4 m, recently 7.8 m diameter shield tunnel was constructed in the lower section of the Incheon International Airport runway and is planning or under construction to roads and railway tunnels in the lower section of the Han River. Segments are also becoming larger as the shield tunnel cross-section increases, which causes a number of problems in the design, construction, and performance evaluation of segments. In this study, segment lining structural safety, criteria for serviceability check considering axial forces and quality control method for approximately 8 m in diameter shield tunnel were reviewed by field measurements and full scale bending test.

**Keywords:** Shield tunnel, Segment, Field measurement, Bending test

### 초 록

실드터널은 직경 3~4 m 규모의 전력구 등에 주로 적용되었으나, 최근 직경 7~8 m 규모의 실드터널이 인천국제공항 활주로 하부에 시공되었으며, 한강 하저구간 도로 및 철도 터널 시공완료 및 계획중에 있다. 실드터널 단면이 증가함에 따라 세그먼트 또한 대형화 되고 있으며, 이로 인하여 세그먼트의 설계, 시공 및 성능평가 시 여러 문제점이 야기되고 있다. 따라서 본 연구에서는 직경 약 8 m 규모의 실드터널에 대한 현장계측 및 실대형 하중재하 시험을 통하여 실드터널 세그먼트 라이닝 구조적 안정성 분석, 축력을 고려한 세그먼트 사용성 검토방안의 적합성 및 품질관리 방안에 대하여 검토하였다.

**주요어:** 실드터널, 세그먼트, 현장계측, 휨시험

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and  
Underground Space Association  
21(5)611-620(2019)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.5.611>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received May 30, 2019

Revised July 24, 2019

Accepted August 2, 2019



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2019, Korean Tunnelling and Underground Space Association

## 1. 서론

세그먼트 라이닝(segment lining)은 공장이나 현장에서 미리 제작된 프리캐스트(precaster) 세그먼트를 조립하여 설치되는 터널 라이닝으로서, 쉴드터널에서 필수적으로 사용되는 구조체이다. 특히, 쉴드터널 세그먼트는 쉴드 TBM의 추진을 위한 반력지지 구조물로서의 역할과 공사 중의 안정성 확보는 물론이고 영구적인 터널 라이닝의 역할도 하게 된다(Lee et al., 2012).

도심지 지하도로 시공에는 현장 여건상 작업환경개선, 시공사이클 향상, 주요 시공변수 관리, 소음진동과 분진이 매우 낮고 지하수위의 교란 최소 및 시공 품질 향상 등 많은 장점이 있는 TBM 공법의 활용이 증가하고 있다.

또한 전력구 등과 같이 직경 3~4 m 규모의 소구경 단면에 주로 활용되었던 TBM 공법은 최근 직경 7~8 m 규모의 도로 및 철도터널 시공에 적용되고 있다.

TBM 공법 적용 단면이 소구경에서 중대단면 터널로 확대 적용됨에 따라, 세그먼트 라이닝의 규모와 중량의 증가는 필연적이라 할 수 있다.

터널표준시방서에서는 휨시험(만곡시험), 이음부 휨시험(만곡시험), 잭 추력시험, 인양고리 인발시험 등의 세그먼트의 품질관리를 위하여 주기적으로 성능검사를 수행하도록 규정하고 있으나, 세그먼트 라이닝의 규모와 중량의 증가로 성능검사를 위한 대형 시험장비와 현장조건과 유사한 구속조건을 재현한 시험체의 파괴하중 확인을 위해서는 높은 수준의 하중재하가 요구된다.

Lee et al. (2014) 연구에 따르면 외경 4.2 m, 길이 2,403 mm, 폭 900 mm, 두께 200 mm 세그먼트의 휨시험 시 구속조건이 롤러-힌지인 경우 균열발생하중은 19.4 kN, 파괴하중은 52.5 kN이었으나, 구속조건이 현장조건과 유사한 힌지-힌지인 경우 균열발생하중은 255.4 kN로 약 13배 증가하였고, 456 kN 재하 시에도 세그먼트의 파괴가 발생하지 않았다.

따라서 직경 7~8 m로 세그먼트 규모 증가 시에는 매우 높은 수준의 하중재하가 필요할 것으로 예상되며, 이는 시험장비 운영의 어려움은 물론 장비운영자 안전사고의 우려가 높다.

따라서 본 연구에서는 실대형 하중재하 시험 및 현장계측 결과의 비교분석을 통하여 쉴드터널 세그먼트 라이닝 구조적 안정성을 분석하였으며, 축력을 고려한 세그먼트 사용성 검토방안의 적합성을 검증하였다. 또한 세그먼트 제작시 주기적으로 수행되는 품질관리 방안에 대하여 검토하였다.

## 2. 실대형 하중재하 시험 및 결과분석

### 2.1 세그먼트 시험체의 제작

본 연구에서는 Lee et al. (2017)이 수행한 쉴드터널 현장계측결과의 비교 분석을 위하여, 대상 현장과 동일한 외경 7,770 mm, 두께(t) 350 mm, 길이(l) 3,614 mm, 폭(w) 1.5 m인 A타입 세그먼트를 시험체로 제작하였다(Fig. 1).

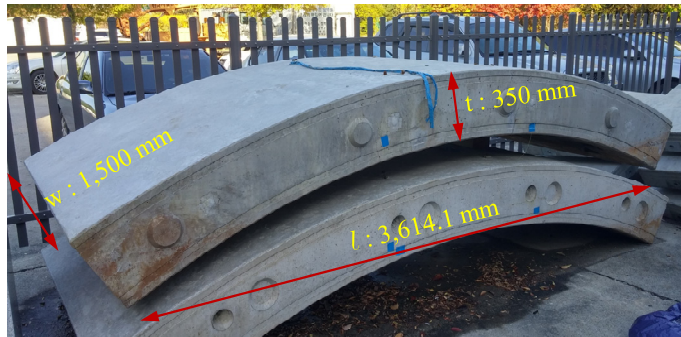


Fig. 1. Specimen dimension

시험체는 현장조건과 동일하게 설계강도 45 MPa인 콘크리트와 설계 항복강도 400 MPa 공칭직경 19 mm 철근을 총 20개(상부 및 하부철근) 배근하여 제작하였으며, 하중재하 시험 시 계측을 위하여 상부철근 2개소 하부철근 6개소에 변형률 게이지를 설치하였다(Fig. 2).

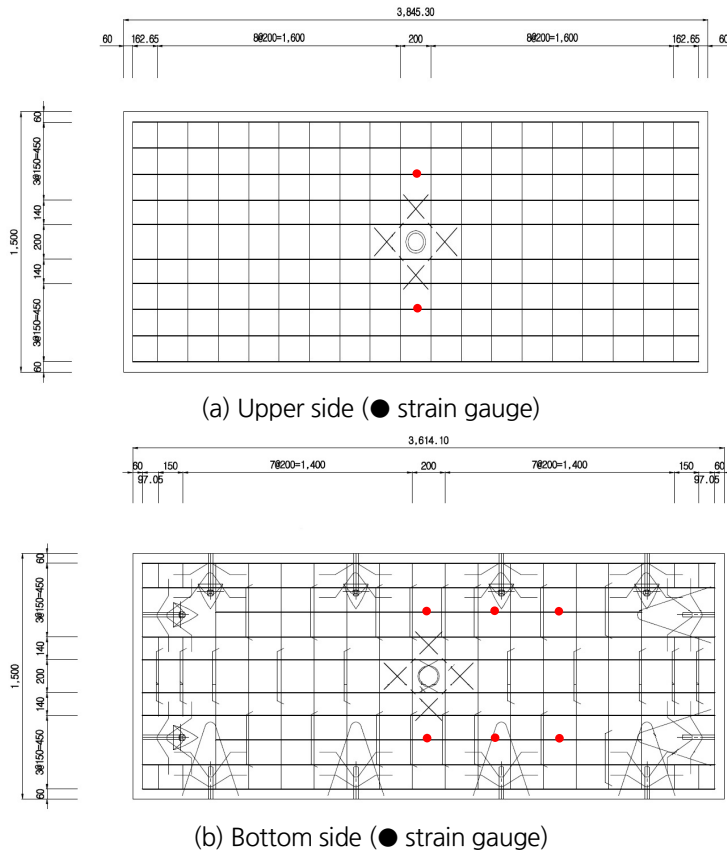


Fig. 2. Arrangement of rebar and strain gauges (unit: mm)

## 2.2 시험 방법

세그먼트의 실물 휨시험은 Lee et al. (2012)의 시험방법과 동일하게 시험체 상부의 재하를 위하여 재하 시스템의 중앙부에 설치된 유압 서보제어 액츄에이터(최대 재하용량: 1,000 kN, 최대 스트로크: 300 mm)를 사용하였다. 액츄에이터 하부에는 지간이 900 mm인 2개의 선하중 재하판을 부착하였고 시험체 하부에는 롤러 베이스를 설치하여, 세그먼트 실물 시험체에 대해 최대 재하하중 600 kN 조건에 대하여 4점 휨시험을 실시하였다(Fig. 3).

시험체 지점부 경계조건은 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 횡방향 방향성을 유지하기 위한 가이드 베이스와 시험체 및 재하하중 지지를 위한 롤러베이스로 구성하였으며, 힌지 및 롤러 조건으로 각각 경계조건을 설정하였다.

모든 시험 시에는 서보제어에 의한 변위제어 시험을 실시하였으며, 변위속도는 재하점을 기준으로 하여 2 mm/min으로 설정하였다. 세그먼트 내부 철근에 설치된 총 8개의 변형율 게이지들로부터 얻어지는 자료는 0.1초당 1개의 속도로 획득하였으며, 본 연구에서는 세그먼트의 중심선(center line)에 설치된 변형율게이지 측정결과를 토대로 시험결과를 분석하였다.

또한 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 세그먼트 시험체 하부에 재하하중 단계별 균열측정을 위하여 고해상도 사진기 설치 및 녹화 후 영상처리기법을 이용하여 재하하중 단계별 균열을 측정하였다.

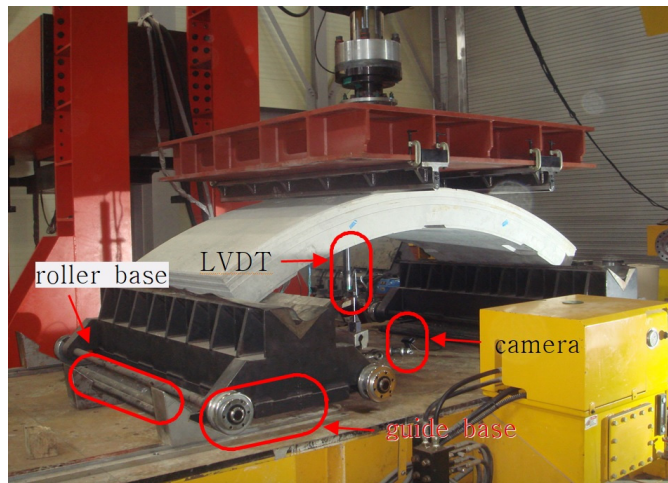


Fig. 3. Panoramic view of bending test

## 2.3 결과분석

본 연구수행을 위하여 제작한 시험체에 대한 하중재하 시험결과 재하하중 101 kN에서 초기 균열(폭: 0.1~0.2 mm)이 발생하였으며, 최대 재하하중 600 kN에서 시험체 파괴는 발생하지 않았으며, 최대 폭 0.8 mm의 균열이 발생하였다(Fig. 4).

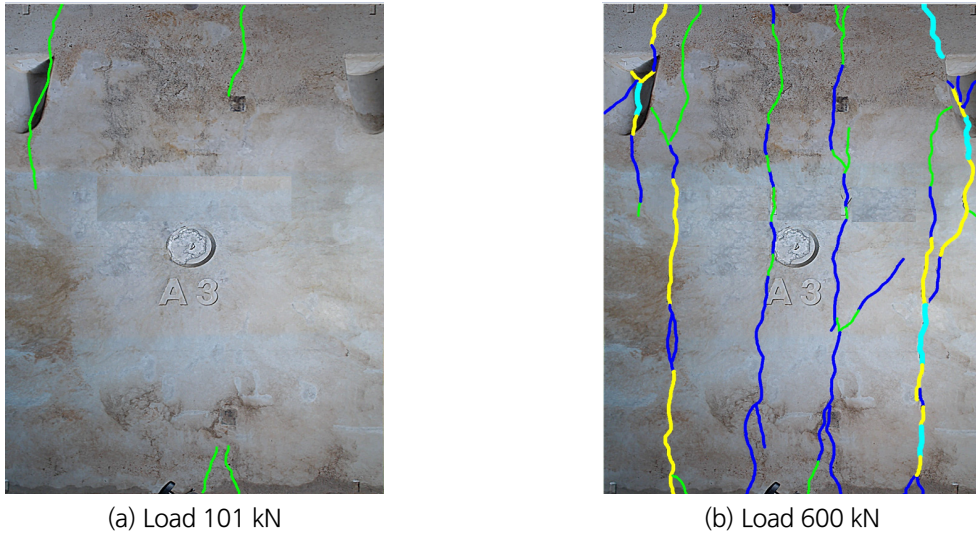


Fig. 4. Crack pattern

하중재하 시험결과 Fig. 5에서 보이는 바와 같이 재하하중과 인장측 및 압축측 철근에 발생하는 변형율은 선형적인 관계를 보이며, 약 220 kN 하중재하 시 인장측 철근은 항복거동을 보이는 것으로 나타났다.

시험결과 계측된 변형율은 철근콘크리트 구조물의 이론적 해석을 통하여 계측지점에 발생하는 휨모멘트를 산정할 수 있다. 초기 균열발생하중 101 kN 재하 시 압축측 철근에 발생한 변형율은  $39.05 \times 10^{-6}$ 으로, 압축측에 설치된 철근이 항복하지 않는 조건에 해당된다. 따라서 콘크리트가 최대변형율 0.003에 도달하기 전에 인장철근은 항복하게 되고, 압축철근의 변형율은 파괴 시 극한변형율에 도달하지 않는다. 이 경우 세그먼트 부재의 압축측에 설치된 철근은 무시하고 인장측 철근만을 고려한 단철근으로 해석할 수 있다(Lee et al., 2010).

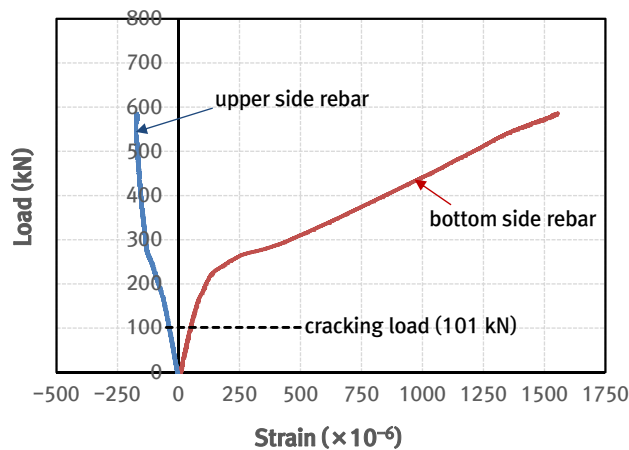


Fig. 5. Load-strain curve

초기 균열발생하중 101 kN 재하 시 인장측 철근에  $49.3 \times 10^{-6}$ 의 변형율이 발생하였으며, 이를 철근콘크리트 구조물의 이론적 해석을 통하여 휨모멘트를 계산하면, 초기 균열발생하중 101 kN 재하 시 시험체 중심선에 약 164 kN-m의 휨모멘트가 발생하는 것으로 나타났다.

### 3. 세그먼트 라이닝 현장계측

#### 3.1 현장계측 개요

실대형 하중재하 시험과 비교분석을 위한 현장계측결과는 Lee et al. (2017)이 수행한 결과를 활용하였으며, 대상 현장의 지반조건은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 지표면에서 쉘드터널 천단부까지의 토피고는 약 19 m로 매립층과 점토층으로 구성되어 있으며, 지하수위는 G.L. -8 m이다. 현장계측 대상 쉘드터널은 퇴적모래층을 관통하여 시공되었으며 쉘드터널 하부는 풍화토로 구성되어 있다. 세그먼트 라이닝 설계 시 적용한 각 지층별 지반정수는 Table 1과 같다.

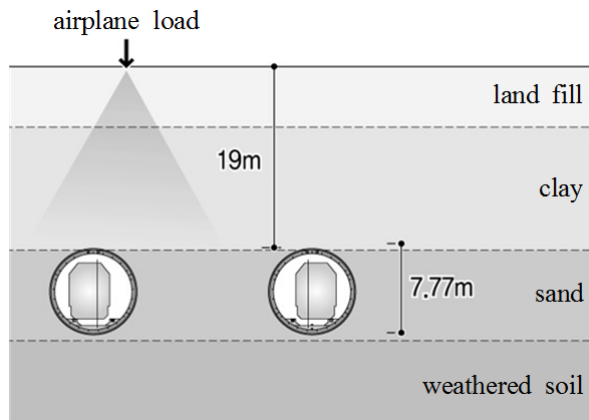


Fig. 6. Ground condition

Table 1. Soil property

|          | Unit weight (kN/m <sup>3</sup> ) | Cohesion (kPa) | Angle of internal friction (°) |
|----------|----------------------------------|----------------|--------------------------------|
| Landfill | 20.0                             | 0              | 29                             |
| Clay     | 18.5                             | 45             | 0                              |
| Sand     | 19.0                             | 0              | 27                             |



### 3.2 현장계측결과

현장계측은 Fig. 7에서 보이는 바와 같이 6개의 세그먼트에 대하여 수행되었으며, 본 연구에서는 실대형 하중재하 시험과 동일하게 인장측 주철근에 최대 변형율이 측정된 Segment No. 2의 계측결과를 비교대상으로 선정하였다.

Segment No. 2의 계측결과는 Fig. 7에서 보이는 바와 같이 세그먼트 라이닝 시공 후 670시간 동안 현장계측을 수행하였으며, 약 90 m 굴진 시(약 250시간)까지는 tail void 그라우팅 압력, 지반굴착 후 발생하는 지반내 응력 재분배, TBM 장비 굴진에 의한 진동 등의 영향으로 계측결과가 변화하며, 이후 일정 값으로 수렴하는 것으로 나타났다.

세그먼트 라이닝 시공 후 250~670시간 범위 내에서 계측된 인장측 철근의 최대 변형율은  $132 \times 10^{-6}$ 이며, 계측된 최대 변형율 및 세그먼트 제원을 토대로 Segment No. 2에 발생하는 최대 휨모멘트는 306 kN-m 인 것으로 나타났다.

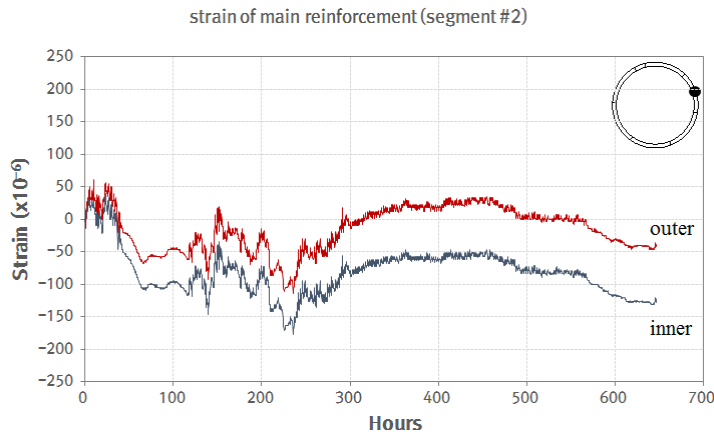


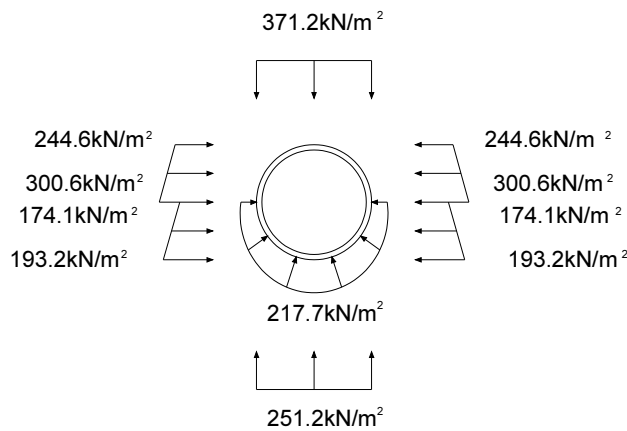
Fig. 7. Monitoring result of segment No. 2

## 4. 실대형 하중재하 시험 및 현장계측 결과 비교분석

현장계측결과 Segment No. 2에 발생하는 최대 휨모멘트는 306 kN-m로 나타났다. 해당 현장 세그먼트 라이닝은 Table 2에서 보이는 바와 같이 5가지 하중조합조건에 대하여 검토하였으며, 이 가운데 Fig. 8에서 보이는 바와 같은 하중조합 조건에 대해 설계하였다. 설계 시 균열 검토를 위한 사용하중 모멘트( $M_o$ ) 315.5 kN-m 보다 약 3% 작은 것으로 확인되었다.

**Table 2.** Load combination cases for segment lining design

| Case    | Dead load | Earth pressure |            | Water pressure |            | Live load |
|---------|-----------|----------------|------------|----------------|------------|-----------|
|         |           | Vertical       | Horizontal | Vertical       | Horizontal |           |
| Combo 1 | 1.4       | 1.4            | 1.4        | 1.4            | 1.4        | 2.0       |
| Combo 2 | 1.7       | 1.7            | 1.7        | 1.7            | 1.7        | 1.7       |
| Combo 3 | 1.2       | 1.2            | 1.5        | 1.2            | 1.5        | -         |
| Combo 4 | 0.9       | 1.2            | 1.5        | 1.2            | 1.5        | -         |
| Combo 5 | 1.0       | 1.0            | 1.0        | 1.0            | 1.0        | 1.0       |

**Fig. 8.** Load combination for segment lining design

실대형 하중재하 시험결과 101 kN 하중재하시 인장측 철근에  $49.3 \times 10^{-6}$ 의 변형율이 발생하였으며 시험체에 서 최초 균열이 관찰되었다.

그러나 현장계측 결과 인장측 철근에는  $132 \times 10^{-6}$  변형율이 계측되었으나, 현장계측과 병행하여 수행한 육안 점검시 균열은 관찰되지 않았다.

실대형 하중재하 시험 시 시험체 지점부 경계조건은 현지-롤러 구속조건에 대해 시험을 수행하였으며, 세그먼트 조립 후 원형터널로 시공되는 쉴드터널의 특성상 세그먼트 라이닝에 축력이 발생하게 되며 이렇게 발생한 축력은 균열발생을 제어하기 때문인 것으로 판단된다.

Lee et al. (2014)의 연구에 의하면 실대형 하중재하 시험 시 세그먼트 시험체를 현지-현지로 구속하는 것이 현장조건과 유사하며, 구속조건 변화에 따라 세그먼트에 작용하는 축력을 고려하는 경우 균열하중은 약 2.7배, 균열모멘트는 2.9배 증가한다고 제안하였다.

따라서 본 연구에서 수행한 실대형 하중재하 시험의 초기 균열하중은 약 443 kN, 균열모멘트는 약 476 kN-m 일 것으로 예상된다.



또한 Lee et al. (2012)에 의하면 본 연구에서 활용한 시험체와 유사한 규모의 시험체를 활용한 하중재하 시험 결과 파괴하중은 균열하중대비 약 4.3~4.6배 정도 큰 것으로 나타났으며(Table 3), 이를 근거로 본 연구에서 수행한 실대형 하중 시험체의 파괴하중은 약 1,900~2,000 kN 일 것으로 예상된다.

**Table 3.** Comparison of crack load and failure load

|        | Load at crack | Load at failure | Note      |
|--------|---------------|-----------------|-----------|
| Case 1 | 145 kN        | 635 kN          | 4.4 times |
| Case 2 | 165 kN        | 710 kN          | 4.3 times |
| Case 2 | 180 kN        | 825 kN          | 4.6 times |

## 5. 결론

본 연구에서는 실대형 하중재하 시험 및 현장계측 결과의 비교분석을 통하여 쉘드터널 세그먼트 라이닝 구조적 안정성을 분석하였으며, 축력을 고려한 세그먼트 사용성 검토방안의 적합성을 검증하였다. 또한 세그먼트 제작시 주기적으로 수행되는 품질관리 방안에 대하여 검토하였다.

1. 현장계측결과 Segment No. 2에 발생하는 최대 휨모멘트와 세그먼트 사용성 검토를 위한 사용하중 모멘트 ( $M_o$ )는 오차율 약 3%로 매우 유사한 것으로 나타났으며, 설계 시 합리적인 하중조건 산정 및 사용성 검토가 수행된 것으로 판단된다.
2. 터널표준시방서에서는 휨시험(만곡시험), 이음부 휨시험(만곡시험), 잭 추력시험, 인양고리 인발시험 등의 세그먼트의 품질관리를 위한 성능검사를 수행하도록 하고 있다. 그러나 도로 또는 철도터널과 같이 쉘드터널 직경이 8 m 급 이상인 경우에는 시험체 규모 대형화로 한지-한지 구속조건에서의 만곡시험은 파괴하중이 2,000 kN에 이를 수 있는 것으로 나타났다.
3. 높은 수준의 하중재하는 시험장비 운영의 어려움은 물론 장비운영자 안전사고의 우려가 높다. 따라서 휨시험은 세그먼트에 발생하는 균열하중 확인만으로도 세그먼트 제작시 주기적으로 수행되는 품질관리를 위한 성능검사가 수행될 수 있을 것으로 판단된다.
4. 실대형 하중재하 시험 시 균열이 발생한 변형율보다 현장계측시 주철근에 큰 변형율이 계측되었으나, 현장조사 결과 균열은 관측되지 않았다. 이는 원형터널로 시공되는 쉘드터널의 특성상 세그먼트 라이닝에 축력이 발생하게 되며 이렇게 발생한 축력은 균열발생을 제어하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 축력을 고려한 사용성 검토는 합리적인 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2014년 건설기술연구사업의 ‘대심도 복층터널 설계 및 시공 기술개발(14SCIP-B088624-01)’ 연구단 및 한국건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업인 “TBM 핵심 설계·부품기술 및 TBM 터널의 최적 건설기술(과제번호: 10기술혁신E091)-2세부과제: 고성능 세그먼트 라이닝의 개발”의 일환으로 작성되었습니다.

## References

1. Lee, G.P., Bae, G.J., Kang, T.S., Chang, S.H., Choi, S.W. (2014), “Analysis of segment lining cracking load considering axial force by varying boundary condition”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 16, No. 2, pp. 173-180.
2. Lee, G.P., Chang, S.H., Bae, G.J., Choi, S.W., Ahn, C.Y. (2017), “Evaluation of shield TBM segment acting load through monitoring data back analysis”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 19, No. 6, pp. 905-913.
3. Lee, G.P., Hwang, J.H., Shin, H.S., Hong, S.K. (2010), “Mechanical behaviour of waterway culvert structure assembled by precast segments”, Journal of the Korean Tunnelling Association, Vol. 12, No. 2, pp. 193-200.
4. Lee, G.P., Park, Y.T., Choi, S.W., Bae, G.J., Chang, S.H., 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 Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14, No. 3, pp. 215-230.