

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.4.549

JCCT 2023-7-66

## 상시처짐을 이용한 공용중인 고속철도 PSC BOX교의 긴장력 손실 예측

### Prediction of Jacking Force Loss for Serviced High Speed Railway PSC BOX Bridge Using Constant Deflection

최정열\*, 김태근\*\*, 정지승\*\*\*

Jung-Youl Choi\*, Tae-Keun Kim\*\*, Jee-Seung Chung\*\*\*

**요약** 공용중인 고속철도의 PSC Box 교량의 긴장력 관리는 교량 성능에 있어 매우 중요한 기능으로 교량 유지관리 시 세밀한 관리가 필요하다. 이에 본 연구에서는 열차(활하중) 재하시험 없이 측정된 상시처짐 결과를 이용하여 PSC Box girder 내부의 긴장력 감소 수준과 긴장력 손실에 따른 재긴장 예측 시기를 연구하고자 한다. PSC Box 거더의 긴장력 감소에 따른 재긴장 시기 예측결과, 준공 이후 약 17년 이전에서는 긴장력 감소(Jacking force loss) 곡선이 완만한 것으로 나타났다. 그러나 17년 이후에서는 긴장력 감소 곡선이 급격하게 변화되는 것으로 나타났다. 따라서 공용연수 증가에 따라 긴장력이 감소하는 것으로 확인되었고, 구조물의 노후화가 진행될수록 긴장재의 손실을 더 급격하게 증가하는 것으로 분석되었다. 향후 공용중인 PSC Box 교량중에서 준공 이후 18년 이상 경과된 구조물의 경우 긴장재 및 주변 손상에 대한 정밀조사가 필요할 것으로 판단된다.

**주요어** : 처짐, 상시처짐, 이론처짐, 긴장력, 확률밀도함수

**Abstract** Jacking force loss management inside the PSC Box girder of a common high-speed railway is a very important feature in girder performance, and requires detailed management during the maintenance of the girder. This study aimed to analyze the timing of re-tension prediction of PSC Box girder based on the reduction level of the packing force inside the girder and the results of the tension loss measured without the train load test. As a result of predicting the timing of re-tension according to the level of tension reduction of the PSC Box Girder, the Jacking Force Loss curve was gently analyzed before the structure reached 17 years after confirmed completion, and 17 years later, it was found that the jacking force loss curve progressed rapidly. The results confirmed that the tension of the structure decreases with the service life increase, but considerably decreases as the structure ages. Therefore, more data and research on tension loss of facilities over 20 years are much required.

**Key words** : Deflection, Constant Deflection, Theoretical Deflection, Jacking Force, Probability Density Function

#### 1. 서론

현재 고속철도 교량은 유지관리가 쉽고 진동 및 소음이 적은 PSC Box교로 단면형상 및 구조형식과 가설

공법 등에 따라 다양하게 분류되는데 캔틸레버공법(FCM), 이동식비계공법(MSS), 압출공법(ILM), 세그먼트공법(PSM) 등이며, 일반적 형식으로는 합성형교, 슬래브교, PSC Box교, 엑스트라도즈교, 사장교, 아치교

\*정회원, 동양대학교 건설공학과 교수 (제1저자)  
\*\*정회원, (주)장민이엔씨 진단팀 상무 (교신저자)  
\*\*\*정회원, 동양대학교 건설공학과 교수 (참여저자)  
접수일: 2023년 5월 26일, 수정완료일: 2023년 6월 15일  
게재확정일: 2023년 7월 3일

Received: May 26, 2023 / Revised: June 15, 2023  
Accepted: July 3, 2023  
\*\*Corresponding Author: ktk3314507@hanmail.net  
Dept. Safety diagnosis team, JangminENC

및 라멘교 등이 있다[1,2]. 본 연구에서 대상 교량의 형식은 현재 공용중인 고속철도의 PSC Box교로 선정하였다. 최근 그림 1과 같이 외부 긴장재의 부식으로 인한 긴장재 파단이 발생한 후, 외부 긴장재 뿐만 아니라 내부 긴장재 부식에 대한 관심이 높아지고 있다[3]. PSC Box 내부의 긴장력 관리가 거더 기능에 있어 매우 중요한 항목이나 현재는 시공 시 설계 긴장력(Jacking force)의 도입 여부만을 확인한 후 공용 중에서도 관리가 이루어지지 않는 실정이다[14]. 또한, 우리나라는 “시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침((2021.12), 국토해양부)”을 의거한 조사방법은 청음조사, 충진결함부 천공, 내시경 조사와 더불어 내부 텐던 긴장재는 강연선 노출 및 손상, 시멘트 그라우팅 충전결함, 보호관 손상만 점검하는 것으로 긴장력 상태와 긴장력 변화에 대한 조사 방법은 없는 상태이다[4]. 다만, 현재로서는 비파괴검사 장비인 G.P.R 또는 내부 공동 여부를 관찰할 수 있는 콘크리트 초음파 단층촬영 장비인 MIRA와 활하중에 의한 재하시험 방법으로 긴장재 및 긴장력 상태를 판단하지만 고가의 장비와 여건상 여러 가지의 문제점인 작업시간, 하천, 고속도로 통과, 장비 진입 불가한 곳은 내부 텐던 긴장재 상태를 확인하기는 매우 어려운 실정이므로, 본 연구에서는 열차(활하중) 재하시험 없이 상시처짐 결과를 통해 PSC Box Girder 교의 긴장력 감소 수준을 예측하고, 긴장력 손실(Jacking force loss)에 따른 결과를 바탕으로 재긴장 시기를 예측하는 목적이 있다[1].

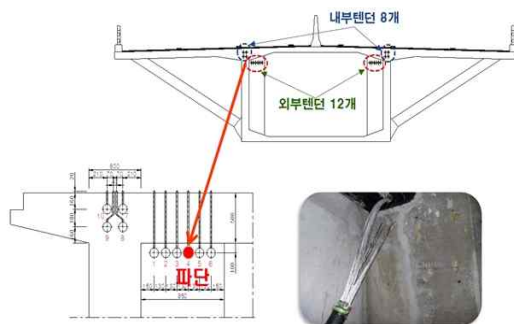


그림 1. 긴장재 부재의 손상현황  
Figure 1. Damage status of tendons

## II. 현장시험

본 연구에서 사용된 현장 처짐 결과( $\delta L$ )는 교량 가설 완료 이후부터 측정 당시까지 발생한 현장 처짐(장

기처짐량)을 의미하며, 이는 시공단계 중 발생한 처짐(시공당시 도입 캠버량, 긴장시 발생한 솟음량, 긴장 직후 발생한 프리스트레스 즉시 손실에 의해 발생한 처짐량, 시공오차 등에 의한 이론치 처짐량과의 오차)을 배제한 값이다. 단, FSM(Full staging method) 공법에서는 가설벤트 해체 시 발생한 처짐량은 해석에서 시공단계 해석결과에 포함되어 있으며 이를 순처짐(초기처짐, Initial deformation,  $\delta D$ )으로 분류하였다. 수치해석 결과에서는 『고정하중에 의해 발생된 처짐량 - 긴장력에 의해 발생된 처짐량』으로 산정할 수 있다. 긴장력 손실이 발생할 경우 긴장력의 손실이 구조체에 미치는 영향을 확인하기 위해 구조검토가 우선적으로 필요하고 그에 대한 단면 강성 보강만으로 보강이 되지 않아 추가 긴장력 도입이 필요한 경우에 예비 긴장재를 사용하여 부족한 긴장력을 보충할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 현장측정 처짐을 통하여 긴장력 손실에 따른 재긴장 시기를 예측하고자 한다. 본 연구에서는 13년과 20년 경과된 고속철도 PSC Box Girder교의 거더 내부에서 레벨 측량기 및 광파기를 이용한 측정을 실시하여 상시 처짐 값을 산출하였다.

### 1. 현장측정 방법

본 연구에서는 경간장이 40.0m인 PSC Box교의 내부에서 레벨 및 광파기를 이용한 측정을 실시하였으며 교각 및 중앙부의 현장 처짐을 측정하였다[1].

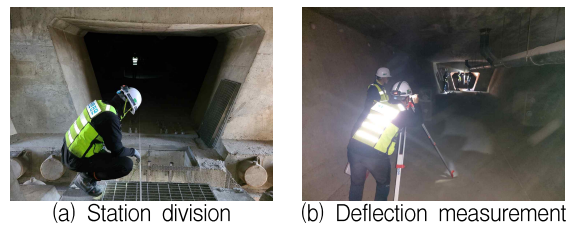


그림 2. 현장 측정 전경  
Figure 2. Photographs of field measurement

### 2. 현장측정 결과 및 분석

본 연구에서는 공용중인 고속철도 PSC Box 62개소의 현장 처짐을 측정한 결과, 13년 경과된 구조물의 현장 처짐은 (-)4mm~(-)25mm, 20년 경과된 구조물의 현장 처짐은 (-)3mm~(-)52mm로 분석하였다. 측정결과, 공용연수 증가에 따라 현장 처짐이 최대 2배 이상 크게 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 고속철도

PSC Box Girder 교량 중 상향 처짐이 발생한 개소를 제외한 후 해당 개소별 상시 처짐값을 분석하였다. 여기서 상시 처짐값은 현장 처짐에서 순처짐(해석)을 제한 값으로 산출하였다. 총 55개소의 처짐값 분석결과, 13년 경과된 구조물의 처짐은 (-)6.19mm~(-)17.19mm, 20년 경과된 구조물의 처짐은 (-)0.19mm~(-)31.19mm로 분석되었다. 따라서 공용연수의 증가에 따라 처짐은 증가하는 것으로 분석되어 시간경과에 따른 긴장력 손실이 처짐 증가에 영향을 미친 것으로 분석되었다.

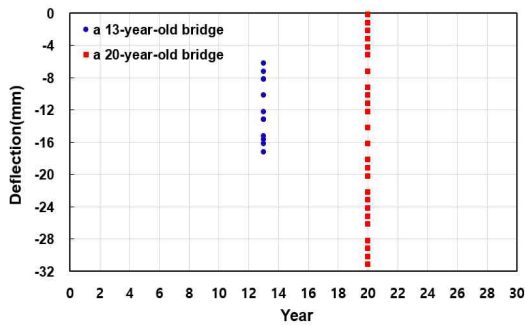


그림 3. 시간 경과에 따른 처짐결과  
 Figure 3. Deflection result of over time

### 3. 가우시안 확률밀도함수 분석결과

13년 및 20년 경과된 구조물의 상시처짐에 대한 확률밀도함수 분석결과는 그림 4와 같다.

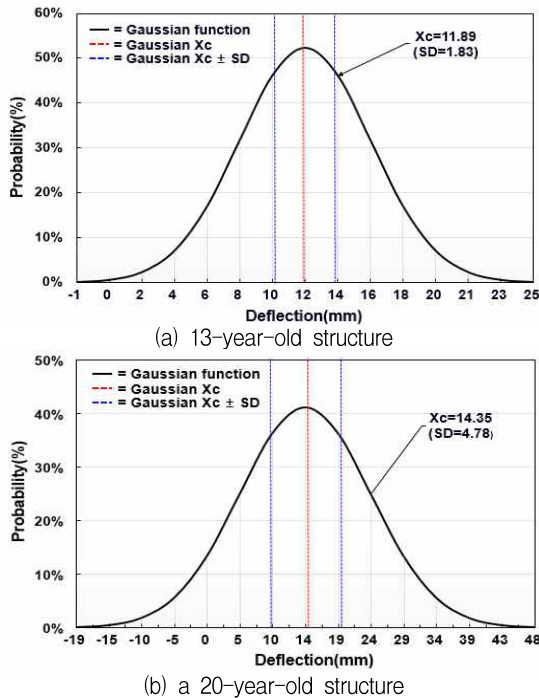


그림 4. 구조물 상시처짐 분석결과  
 Figure 4. Analysis result of structure constant deflection

그림 4와 같이 13년 경과 시 상시처짐은 그림 4(a)와 같이 10.06mm~13.72mm( $X_c=11.89$ ,  $SD=1.83$ )로 분석되었다. 반면 20년 경과 시 상시처짐은 그림 4(b)와 같이 9.58mm~19.13mm( $X_c=14.35$ ,  $SD=4.78$ )로 분석되었다.

## III. 수치해석

### 1. 개요

콘크리트는 시간이 경과함에 따라 재료의 물리적 특성이 바뀌는 시간 의존적 재료이다. 콘크리트의 압축강도는 시간이 경과함에 따라 점점 증가하며, 크리프와 건조수축은 콘크리트의 거동에 중요한 영향을 미치고 있다.

본 연구에서는 고정하중이 적용된 조건에서 시간 경과에 따른 수치해석을 실시하였으며, 공용연수는 1~30년까지의 시간 변화에 따른 이론처짐을 검토하였다. 또한 최초 긴장력의 감소율(10%~40%)을 매개변수로 하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석 방법으로는 신뢰도와 정확성을 높이기 위하여 교각을 포함한 하부와 상부구조를 일체로 Full modelling하였으며, 해석 프로그램은 MIDAS/CIVIL을 사용하였다. 수치해석에서 적용한 해석단계별 과정은 표 1과 같다[1].

표 1. 수치해석 하중조건

Table 1. Analysis load condition

Component		Analysis purpose	Consideration
Analysis Step	Construction	Creep and shrinkage	Prestress loss
	Dead load	Section force	Self load, concrete bed etc.
	Additional load	Section force	Temperature change, wind load and seismic load

### 2. 시간 경과에 따른 이론 처짐 분석

고정하중, 텐던의 긴장력, 건조수축, 크리프 등을 적용한 수치해석결과, 그림 5와 같이 시간 경과에 따른 처짐 곡선을 산출하였다.

13년이 경과된 구조물의 이론처짐은 (-)11.23mm, (-)12.69mm로 분석되었고, 20년 경과 시 이론처짐은 (-)11.81mm, (-)13.30mm로 검토되었다. 또한 이론처짐 곡선은 1년에서 20년 사이에서 급격한 기울기가 나타났으나, 20년 이후부터는 이론처짐 곡선의 기울기가 완만하게 변화되는 것으로 분석되었다.

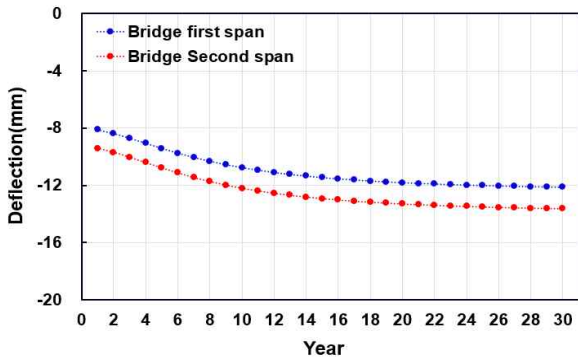


그림 5. 시간 경과에 따른 이론 처짐결과  
Figure 5. Theoretical deflection results of over time

2. 긴장력 손실 분석결과

긴장력 손실율(10~40%)을 매개변수로 한 수치해석 결과, 긴장력 손실에 따른 이론처짐 결과는 표 2와 같다[1].

표 2. 긴장력 감소에 따른 이론처짐 결과  
Table 2. Theoretical Deflection results due to reduced jacking force loss

Reduction ratio	Theoretical deflection range	Theoretical deflection (13 years)	Theoretical deflection (20 years)
10%	10.27mm~14.27mm	(-)13.39mm	(-)13.95mm
20%	12.47mm~16.45mm	(-)15.59mm	(-)16.15mm
30%	14.79mm~18.80mm	(-)17.93mm	(-)18.49mm

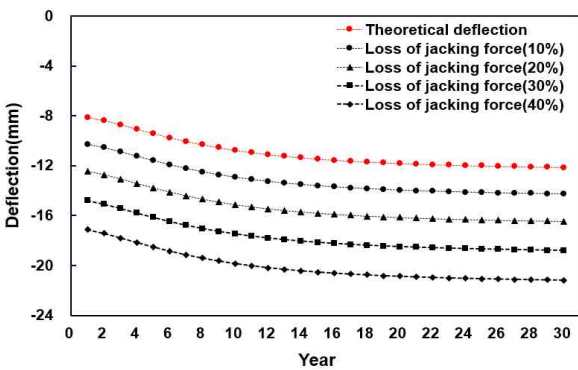


그림 6. 시간경과 및 긴장력 손실에 따른 이론 처짐결과  
Figure 6. Theoretical deflection results with over time and jacking force loss

그림 6과 같이 긴장력 손실 및 시간경과에 따른 이론처짐 곡선은 1년에서 20년 사이는 급격한 곡선으로 나타났지만 20년 이후 완만한 곡선으로 분석되었다.

이는 공용연수 경과에 따른 건조수축과 크리프의 영향에서 기인된 것으로 판단된다. 또한, 13년 경과된 구조물의 최대 처짐은 (-)20.31mm, 20년 경과된 구조물의 최대 처짐은 (-)20.87mm로 분석되었다.

IV. 분석 및 고찰

1. 시간경과에 따른 상시처짐 확률평균값과 이론처짐 분석

공용중인 고속철도 PSC Box 교량의 시간 경과에 따른 상시처짐 확률평균값과 이론처짐을 비교 및 분석하였다. 상시처짐 확률평균값과 이론처짐 곡선은 그림 7과 같다. 13년 및 20년 경과된 구조물은 이론처짐보다 현장에서 측정된 상시처짐 확률평균값이 더 크게 분석되었으며, 공용연수 증가에 따라 상시처짐 확률평균값은 더욱 증가하는 것으로 분석되었다. 시간 경과에 따른 이론처짐은 완만한 곡선으로 나타났으나 상시처짐 확률평균값은 급격한 곡선으로 분석되었다.

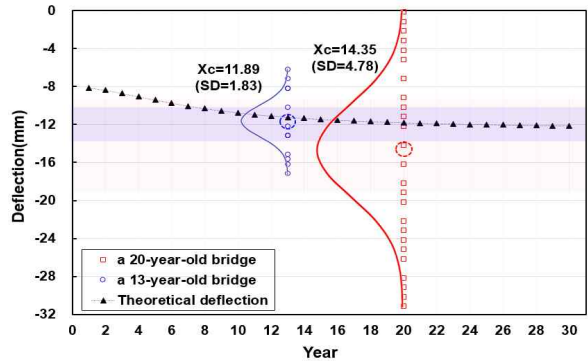


그림 7. 시간경과에 따른 상시처짐 확률평균값과 이론처짐 비교  
Figure 7. Comparison of the average regular deflection Probability of and theoretical deflection over time

2. 긴장력 손실에 따른 처짐결과 분석

최초 긴장력에서 10%씩 단계별 긴장력 손실을 고려한 이론처짐 해석결과와 상시처짐 확률처짐값을 비교 및 분석하였다.

2.1 13년 경과 시 긴장력 손실에 따른 처짐 분석결과

PSC Box교의 13년 경과 시 단계별(10%~40%) 긴장력 손실에 대한 결과와 시간 경과에 따른 상시처짐 확률평균값을 비교한 결과는 그림 8과 같다.

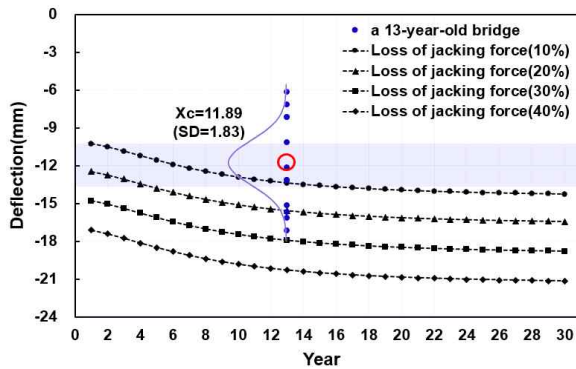


그림 8. 13년 경과 구조물의 긴장력 손실에 따른 처짐분석  
 Figure 8. Analysis of deflection due to loss of structure jacking force loss after 13 years

13년 경과 구조물의 상시처짐 범위는 10.06mm~13.72mm( $X_c=11.89$ ,  $SD=1.83$ )로 분석되었다. 그림 4와 같이 긴장력 손실 10% 구간에서 상시처짐 확률평균 범위가 포함된 것으로 검토되었다. 따라서 공용중인 PSC Box 교량 중에서 13년 경과된 구조물의 경우 긴장력의 손실은 약 10% 범위 이내인 것으로 예측되었다.

2.2 20년 경과 시 긴장력 손실에 따른 처짐 분석결과  
 20년 경과 구조물의 상시처짐 범위는 9.58mm~19.13mm( $X_c=14.35$ ,  $SD=4.78$ )로 분석되었다. 그림 9와 같이 긴장력 손실은 10%~30% 구간에서 상시처짐 확률평균 범위가 포함되었다.

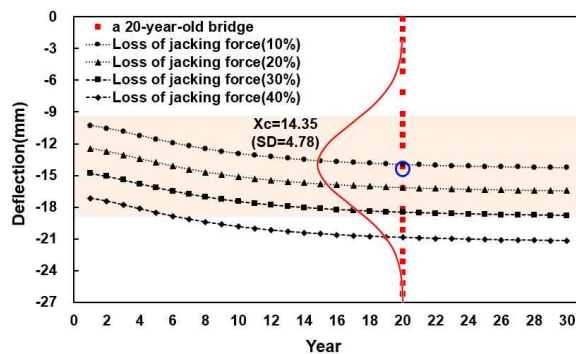


그림 9. 20년 경과 구조물의 긴장력 손실에 따른 처짐분석  
 Figure 9. Analysis of deflection due to loss of structure jacking force loss after 20 years

긴장력 손실 10%에서 상시처짐 확률평균값이 크게 나타난 것으로 볼 때, 공용중인 PSC Box 교량 중 20년 경과된 구조물의 긴장력 손실 수준은 약 10% 발생된 것으로 예측되었다. 따라서 20년 이상의 구조물에 대한

안전점검 시 텐던의 긴장재 및 주변 손상에 대해 면밀한 유지관리가 필요할 것으로 판단된다.

### 3. 긴장력 감소를 고려한 재긴장 시기 예측결과

본 연구에서는 공용중인 PSC Box 교량의 시간 경과에 따른 긴장력 감소 수준을 고려하여 재긴장 시기를 예측하였으며, 그림 10과 같다.

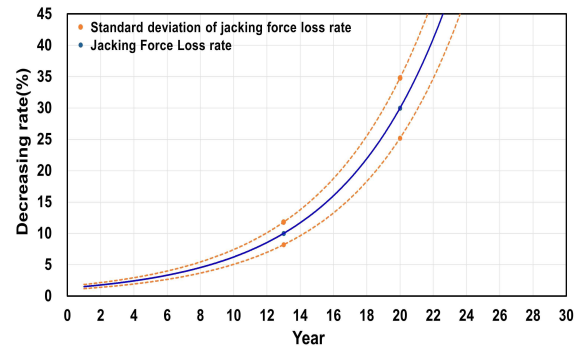


그림 10. 긴장력 감소 수준 및 재긴장 시기 예측결과 곡선  
 Figure 10. Jacking force loss reduction level and re-prestressing timing prediction result curve

공용중인 PSC Box 교량의 긴장력 감소 수준은 13년 경과와 20년 경과 구조물에서 각각 10%, 30%의 손실률이 검토되었다. PSC Box 교량 준공 후 17년 경과 이전에는 긴장력 감소 곡선이 완만히 증가하는 곡선으로 나타났으며, 17년 경과 이후에는 급격히 증가하는 곡선으로 분석되었다. 또한 표준편차 및 긴장력 손실의 변동 폭은 PSC Box 교량 준공 후 13년 경과 시 보다 20년 경과 시 크게 증가하는 것으로 분석되었다.

또한 공용연수 증가에 따라 긴장력 감소율이 증가하는 것으로 나타났으며, 구조물의 노후화가 될수록 긴장력의 손실은 더 급격하게 증가 되는 것으로 분석되었다. 따라서 준공 이후 약 18년 경과된 구조물에 대한 안전점검 및 유지관리 시에는 긴장력 감소 수준을 고려한 긴장재 및 주변 손상에 대해 정밀한 조사가 필요할 것으로 판단된다.

## V. 결론

본 연구에서는 공용중인 고속철도 PSC Box 교량에 대해 재하시험 없이 측정된 상시처짐 결과를 통하여 긴장력 감소 수준을 예측하고, 긴장력 손실을 고려한 재긴장 예측시기를 제시하였다.

(1) 현장측정결과, 55개소 경간에 대한 13년 경과 시 현장처짐은 (-)6.19mm~(-)17.19mm 20년 경과 시 (-)0.19mm~(-)52mm로 분석되었다. 상시처짐에 대한 확률밀도함수 분석결과, 13년경과 시 상시처짐 범위는 10.06mm~13.72mm( $X_c=11.89$ ,  $SD=1.83$ )이며, 20년 경과 시 상시처짐 범위는 9.58mm~19.13mm( $X_c=14.35$ ,  $SD=4.78$ )로 분석되었다.

(2) 수치해석을 통해 시간 경과에 따른 이론처짐 및 긴장력 손실에 따른 처짐을 산출함으로써 측정결과와 비교 및 분석하였다. 13년 및 20년 경과된 구조물의 경우 이론처짐보다 현장에서 측정된 상시처짐 확률평균 값이 더 크게 분석되었다.

(3) 단계별 긴장력 손실에 따른 이론처짐과 상시처짐 분석결과, 13년 경과된 구조물의 긴장력 손실율은 약 10% 범위 이내, 20년 경과된 구조물은 약 30%이며, 긴장력 손실은 10%에서 발생된 것으로 예측되었다. 긴장력 감소를 고려한 재긴장 시기 예측결과, 준공이후 약 17년 경과 이전에서는 긴장력 감소 곡선이 완만하게 분석되었고, 17년 이후에서는 긴장력 감소 곡선이 급격한 것으로 분석되었다. 또한 표준편차 및 긴장력 손실의 변동 폭은 13년 경과 구조물보다 20년 경과 시 크게 나타났다. 따라서 공용연수가 증가 될수록 구조물의 긴장력은 감소되는 것으로 나타나 구조물 노후화가 진행될수록 긴장재의 손실은 급격하게 증가되는 것으로 나타났다. 공용중인 고속철도 PSC Box교량 중 준공이후 약 20년이 경과된 구조물에 대한 안전점검 및 유지관리 시에는 긴장재 및 주변 손상에 대해 정밀한 조사가 필요할 것으로 판단된다.

(4) 고속철도는 2004년 개통 이후 약 20년 동안 성실하게 안전점검 및 유지관리를 수행했다. 그러나 20년 이상 경과 되는 시설물이 증가하는 추세이므로, 연구결과와 같이 긴장력 손실에 대한 상시처짐 변화 분석결과를 활용하여 재긴장 시기 및 처짐 형상 등 유지관리에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 보다 정확한 연구를 위해서는 13년부터 20년 사이에 있는 PSC Box 교량에 대해 추가조사 및 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## References

- [1] T.K. Kim, "A Study on Prediction of Jacking Force Loss for Serviced High Speed Railway PSC Box Bridge Using Constant Deflection", Master thesis, DongYang University, 2022.
- [2] Korea Institute of Construction and Technology, "A Study on the Establishment of advanced design for material quantity reduction and quality improvement of PSC box girder bridges", 2004.
- [3] Seoul Facilities Corporation, "An Empirical Study on the Maintenance of External Tendon PSC Box Bridges", Academic Service, 2017.
- [4] National Land Safety Management Agency, "Detailed Guidelines for Implementing Safety and Maintenance of Facilities (Safety Inspection and Diagnosis) Ministry of Land Infrastructure and Transport, 2021.
- [5] Anabolic Technology, Design and Construction of Prestressed Concrete, 2012.
- [6] Road Traffic Research Institute, "A Study on the Analysis and Evaluation of PSC Bridge for Strand Damage Scenario", Korea Expressway Corporation, 2018.
- [7] National Railroad Corporation, "2021 Gyeongbu High Speed Line A and B Bridge Precision Safety Diagnosis Report", 2021.
- [8] National Railroad Corporation, "2020 Gyeongbu High Speed Line C and D Bridge Precision Safety Diagnosis Report", 2020.
- [9] National Railroad Corporation, "2019 Gyeongbu High Speed Line E Bridge Precision Safety Diagnosis Report", 2019.
- [10] J.H. Lee, "Prediction of Long-term Deflection of Prestressed Concrete Bridges Considering Various Construction Processes and Girder Section Characteristics", Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 19, No. 1, pp. 25-33, 2019. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2019.19.1.25>
- [11] H.E. Park, J.W. Choi, M.S. Kim, Y.H. Lee, "A Parametric Study of Deflection Analysis of the Prestressed Beams using Finite Element Analysis", Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 28, No. 1, pp. 39-46, 2015. <https://doi.org/10.7734/COSEIK.2015.28.1.39>
- [12] Korea Railroad Facilities Corporation, "Design of Upper Structures", 2012.
- [13] Ministry of Land Infrastructure and Transport, "Design Criteria for Prestressed Concrete Structures", 2022.
- [14] J.K. Kim, J.Y. Park, A.Q. Zhang, H.W. Lee, S.H. Park, "Prestressing Loss Management for PSC Girder Tendon Based on EM Sensing", Journal

- of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 28, No. 4, pp. 369–374, 2015. <https://doi.org/10.7734/COSEIK.2015.28.4.369>
- [15]J.Y. Choi, D.I. Kim, “A Study on Shrinkage Crack of Steel Composite Concrete Box Structure (Transfer Girder)”, The Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT), Vol. 8, No. 6, pp. 685–691, 2022. <https://doi.org/10.17703/JCCT.2022.8.6.685>
- [16]J.Y. Choi, S.J. Lee, J.S. Chung, “A Study on Evaluation Method of Cable Tension for Railway Steel Composite Bridge”, The Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT), Vol. 8, No. 3, pp. 407–413, 2022. <https://doi.org/10.17703/JCCT.2022.8.4.407>