

# PSC I 거더교 유지관리를 위한 긴장재 손상에 따른 거동 분석

박종호<sup>1</sup>, 최진웅<sup>2\*</sup>

## Analysis of Behavior due to Tendon Damage for Maintenance of PSC I Girder Bridge

Jongho Park<sup>1</sup>, Jinwoong Choi<sup>2\*</sup>

**Abstract:** Prestressed concrete (PSC) bridges are vulnerable to corrosion and fracture of tendons, and in particular, structures using the internal post-tensioned with grouted system have difficulties in maintenance due to limitations of inspection. In this study, the actual behavior of PSC I girder bridge was analyzed according to tendon damage. The target PSC I girder bridge, an decommissioned highway bridge of upper and lower bridges, had the service period of 33 years and 20 years, respectively. Deflection and concrete strain were measured according to the location of damaged tendon and loading method. Regardless of the age of the bridge, its structural performance decreased when the damaged tendon was closer to the center of the girder. The change in behavior increased as the truck load approached to the girder where the tendon cut. If the load was applied to the adjacent girder where the tendon was cut, the structural performance was likely to be maintained due to the influence of the entire structural system. The change in deflection was difficult to observe visually, while the concrete strain exceeded the cracking strain. Therefore, it is recommended that future monitoring and inspection of PSC I girder bridges should focus on concrete strain or cracking.

**Keywords:** Tendon, Damage, PSC I girder bridge, Maintenance

### 1. 서 론

한국도로공사에서 관리하는 교량 구조물 중 PSC I 거더교 형식으로 분류 가능한 교량은 전체 교량의 약 35%로 가장 많이 준공된 형식이며, 2030년까지 30년 이상 PSC I 거더교는 약 3배 이상 증가된다. PSC I 거더교 형식을 비롯한 프리스트레스트 콘크리트 교량은 긴장재의 부식과 파단에 취약하다. 영국에서는 준공 후 15년된 Bickton Meadows 보도교의 내부 긴장재 부식에 따른 붕괴 이후 다수의 교량이 긴장재 부식에 따른 교체 및 붕괴가 발생하면서 포스트텐션을 적용한 교량을 금지한 적이 있다. 이후 영국, 미국, 일본 등에서 다양한 긴장재 손상 사례가 나타나면서(Ex, 2021), 포스트텐션 교량의 긴장재 부식에 따른 재료와 콘크리트 구조물의 거동 평가를 위한 다양한 연구가 수행되었다(Vereecken, 2021).

일반적으로 긴장재의 부식은 단면 일부가 손상됨으로써 구조물에 영향을 미치므로 단면 형상 변화를 중심으로 긴장재

의 거동 변화가 분석되었다(Hartt and Lee, 2016; Jeon et al., 2019). 부식 긴장재의 응력 수준에 따른 성능의 변화, 부식 긴장재의 성능 예측을 위한 분석 모델과 확률적 모델이 제시되었다(Darmawan and Stewart, 2007(a); Darmawan and Stewart, 2007(b); Li et al., 2011; Lu et al., 2016; Jo et al., 2017; Vecchi et al., 2021). 길이 변화에 따른 종방향 부식 단면의 영향을 고려한 통계적 모델과 음향방출(Acoustic emission) 기법을 이용하여 내부 긴장재의 부식 정도를 직접 측정하여 선형 및 비선형 모델이 제시되기도 하였다(Zhang et al., 2019; Rashednia et al., 2018; Kim and Seo, 2018).

긴장재 부식에 따른 거동 변화와 함께 콘크리트 부재에 미치는 영향도 분석되었다. 부식에 따른 긴장재 파단 위치를 고려한 콘크리트 보의 휨 실험이 진행되었으며(Coronelli et al., 2009), 부식에 따른 부착 성능 감소를 휨 균열에 따른 부착력 감소 모델을 통해 반영함으로써 PSC 보의 휨 강도를 예측하였다(Dai et al., 2019). 긴장재 부식에 대한 재료적 측면 접근 외에 유지관리 전략 수립을 위해 PSC 보 및 교량의 잔여 강도 및 수명을 검토하기 위한 연구도 동시에 진행되었다. Darmawan and Stewart(2007(a))은 긴장재 부식 확률 모델을 활용하여 AASHTO type IV bridge girder에 대한 확률론적 유한요소해석을 수행하였다. 해석 결과, 발생 가능한 붕괴의 45%는 과도

<sup>1</sup>정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 박사후연수자

<sup>2</sup>정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원, 교신저자

\*Corresponding author: jchoi@ex.co.kr

Korea Expressway Corporation Research Institute, Hwaseong-si, 18489, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2024년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2024년 6월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

한 처짐이 없는 상태에서 발생하여 교량 안전성에 심각한 문제를 유발할 가능성이 높은 것으로 나타났다. Kim et al.(2008)은 PZT(piezoelectric zirconate-titanate) 패치를 이용한 임피던스 특성 변화를 통해 긴장력 감소에 의한 손상 유형을 구분하는 모니터링 체계를 제안하였다. Gou et al.(2016)은 강관, FRP, 외부 프리스트레싱 공법으로 보강된 PSC 박스 거더교의 긴장재 부식을 고려한 시간의존적 신뢰성 해석을 수행하여 효율적 보강 전략 수립을 위한 의사결정을 지원하고자 하였다. Kim et al.(2018)은 리스크 매트릭스를 활용하여 긴장재 조사를 위한 선별 방법을 제안하였다.

PSC 교량의 유지관리를 위한 다양한 기준 및 가이드라인도 제시되었다. NASEM(2017)은 포스트텐션 상태 조사의 신뢰성 및 효율성 증진을 위하여 다양한 비파괴검사를 활용한 조사 방법을 제시하고 있으며, NH(2020)에서는 PSC 교량의 외부 징후가 없는 취성파괴를 큰 문제점으로 지적하며 리스크 관리를 도입하였다. FHWA(2013)에서는 그라우트 결합의 종류와 검사를 위한 최소 시험 샘플 개수, 위치 선택, 시험 방법 등을 체계적으로 제시하였다. 국내에서는 2016년 PSC 박스 거더교의 외부 긴장재 부식으로 인한 파단이 발견되면서 PSC 교량의 유지관리에 관한 경각심이 높아졌다. ‘시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(안전점검·진단편)(2018)’에서 프리스트레스트 콘크리트 거더 상태평가 기준에 긴장재의 강연선 노출 및 손상, 시멘트 그라우트 충전 결합, 보호관 손상 평가를 위한 기준이 개정되었다(MOLIT, 2018).

다만, 긴장재 평가를 위한 기준이 마련되었다 하더라도 조사 위치 및 방법, 시기 등을 선택함에 있어 여전히 유지관리에 어려움이 존재한다. 또한 대부분의 연구가 이론적 모델 및 확률론적 모델에 기반하고 있기 때문에 실제 PSC 교량의 긴장재 손상에 따른 거동을 분석할 필요성이 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 PSC I 거더교의 긴장재 절단을 통해 손상 상황을 재현한 후 재하실험을 수행하여 전체 교량 구조물의 거동 변화를 분석하였다. 이를 통해 실제 교량의 유지관리 수행 시 긴장재 손상과 관련된 구조적 거동을 파악하는데 도움이 될 것이다.

## 2. 실험계획

### 2.1 대상 교량

긴장재 절단을 재현하기 위하여 호남선의 폐교량을 선정하였다. 대상 교량은 상·하행 각각 1973년, 1986년 준공되어 2006년 동시 폐교되었으며, 11.7 m의 폭을 가지고 있다.

### 2.2 긴장재 절단

두 교량 모두 PSC I 거더 5개로 구성되어 있으며, 긴장재 절단은 최외측 거더에서 수행하였다. 정확한 도면이 확보되지

않아 절단된 긴장재의 위치를 Fig. 1에 간략하게 나타내었다. 상행(N) 교량의 경우 4개의 긴장재가 거더 단부에 정착되고 3개의 긴장재는 상부에 정착되어 있는 형태이며, 단부 복부에 정착된 긴장재 2개를 순차적으로 절단하였다. 하행(S) 교량의 경우 5개의 긴장재가 단부에 정착되어 있으며, 중앙부 최외측 긴장재 2개를 순차적으로 절단하였다.

### 2.3 재하계획

트럭 하중은 만재한 15톤 트럭을 사용하였으며, 전륜 5.6톤, 후륜1은 11.28톤, 후륜2는 10.05톤으로 총 중량은 26.9톤이다. 재하 조건은 정적·동적 상태와 긴장재 절단 상황을 구분하였다. 정적재하는 긴장재가 절단되는 최외측 거더에 직접 하중을 재하하는 경우와 인접 거더인 두 번째 거더에 하중을 재하하는 형태로 구분되며, 두 조건 모두 거더와 트럭 바퀴가 일치하도록 하였다. 동적 상태의 경우 정적재하 이후 교량 외곽과 중앙을 순차적으로 주행하도록 하였다. 트럭 하중과 하중 재하 상태에 따른 계획을 Fig. 2에 나타내었다.

긴장재 절단 영향을 검토하기 위하여 긴장재 절단 전, 긴장재 1개 절단 후, 긴장재 2개 절단 후의 3단계 조건을 구분하였으며 각 단계별로 Fig. 2의 하중을 적용하였다. 재하방법에 따른 조합을 Table 1에 나타내었다. 교량 방향에 따라 상행은 N(North), 하행은 S(South)로 구분하며, 상행 교량의 첫 번째 거더 긴장재 절단 전의 경우 ‘N-1-0’으로 표현할 수 있다.

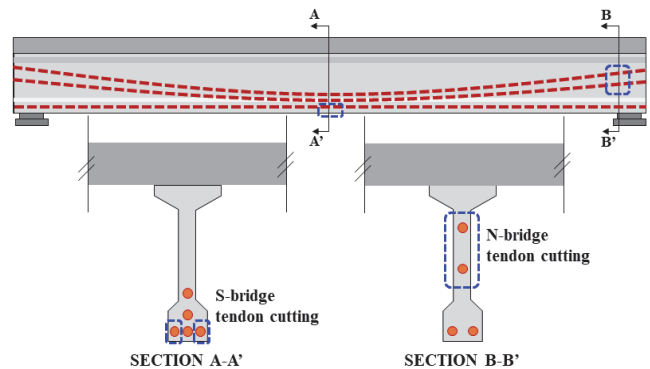


Fig. 1 Location of tendon cutting

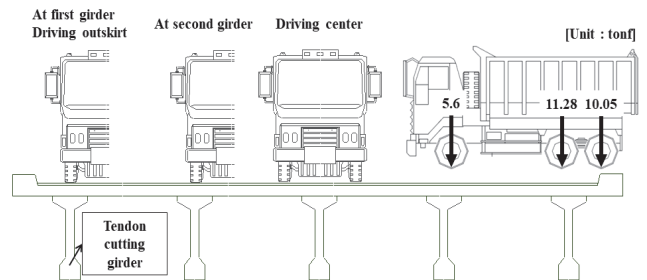


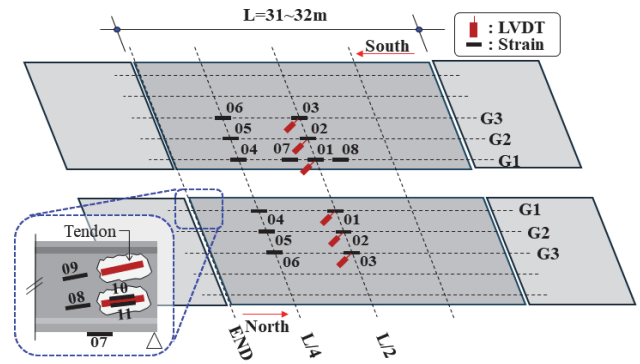
Fig. 2 Loading location and truck weight

**Table 1** Experimental case by loading type

Loading type		Name
At first girder	Before cutting	1-0
	1 <sup>st</sup> tendon cutting	1-1
	2 <sup>nd</sup> tendon cutting	1-2
At second girder	Before cutting	2-0
	1 <sup>st</sup> tendon cutting	2-1
	2 <sup>nd</sup> tendon cutting	2-2
Driving outskirts of bridge	Before cutting	3-0
	1 <sup>st</sup> tendon cutting	3-1
	2 <sup>nd</sup> tendon cutting	3-2
Driving center of bridge	Before cutting	4-0
	1 <sup>st</sup> tendon cutting	4-1
	2 <sup>nd</sup> tendon cutting	4-2

**2.4 계측 계획**

본 연구에서는 공용중인 PSC I 거더교의 긴장재 절단에 따른 처짐과 변형률을 측정하기 위하여 LVDT(Linear Variable Displacement Transducer)와 콘크리트 변형률 게이지를 교량에 부착하였다. 계측 게이지 부착 위치를 Fig. 3에 나타내었다. LVDT는 긴장재 절단 거더 및 인접거더 2본을 포함하여 총 3본의 거더 중앙부에 설치하였으며, 중앙부 긴장재를 절단하는 하행선의 경우 최대한 인접한 위치에 설치하였다. 콘크리트 변형률 게이지는 총 3본의 거더 중앙부 및 L/4 지점에 2개



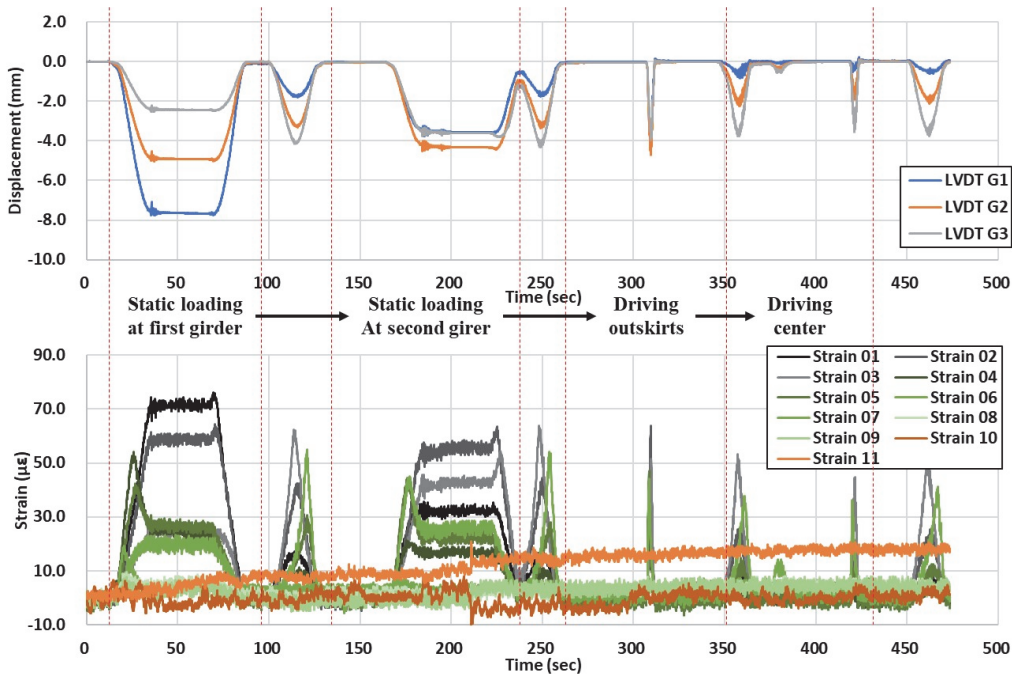
**Fig. 3** Schematic of sensor placement

씩 설치하였으며, 긴장재 절단 위치에 추가 게이지를 부착하였다. 상행 교량의 첫 번째 절단 긴장재에는 2개의 스틸 변형률 게이지를 부착하였다.

**3. 실험결과 및 분석**

첫 번째 긴장재 절단 이후 트럭 하중 재하 이력에 따른 계측 결과값을 Fig. 4에 나타내었다. 변위 그래프의 (-) 방향은 처짐을 나타내며, 변형률 그래프의 경우 (+)은 인장, (-)는 압축 변형률을 나타낸다.

긴장재가 절단된 첫 번째 거더에 하중이 재하 될 경우 처짐과 변형률 모두 가장 큰 값이 계측되었다. 이후 재하 조건에서



**Fig. 4** Experimental results according to loading history of N-bridge after first tendon cut

의 계측값은 첫 번째 정적하중 재하 시와 유사하거나 낮은 값을 나타내었다. 특히 교량 외곽 및 중앙 주행 시의 경우 트럭의 진입 속도, 경로 등의 미세 조정이 어려워 개별 시험의 정량적 비교는 어려울 것으로 판단된다. 따라서 긴장재 절단에 따른 실제 교량의 거동은 긴장재 절단 위치에 하중이 재하 되는 첫 번째 재하조건에 대하여 검토하였다.

### 3.1 상행교량 실험 결과

#### 3.1.1 처짐

상행 교량의 긴장재 절단 단계별 변위를 Fig. 5에 나타내었다. 최외측 거더(G1)의 처짐은 긴장재 절단 단계에 따라 점차 증가하는 양상이 나타났다. N-1-2(G1) 처짐은 7.9 mm로 절단 전 7.6 mm 대비 약 4% 소폭 증가하였다. 나머지 인접 거더인 G2 및 G3 거더의 처짐 변화는 나타나지 않았다.

#### 3.1.2 변형률

상행(N) 교량의 콘크리트 변형률을 Fig. 6(a), 6(b), 6(c)에 나타내었다. 각 거더의 중앙부 콘크리트 변형률은 변위 결과와 동일한 양상을 나타내었다. N-1-2(01, G1)은 73.4  $\mu\epsilon$ 으로

N-1-0(01, G1) 67.6  $\mu\epsilon$  대비 8.6% 증가하였다. L/4 지점의 콘크리트 변형률은 첫 번째 긴장재 절단 시 응력이 소폭 감소하였다가 두 번째 긴장재 절단 시 다시 증가하였다. 다만, G1과 G2 거더의 변형률 크기는 중앙부 대비 약 50% 미만이며, G3의 변형률 변화가 크지 않다. 단부 하부의 콘크리트 변형률 두 번째 절단 이후 N-1-2(07, bottom)의 변형률은 19.1  $\mu\epsilon$ 로 첫 번째 절단 단계인 N-1-1(07, bottom)의 3.8  $\mu\epsilon$  보다 5배 증가하였

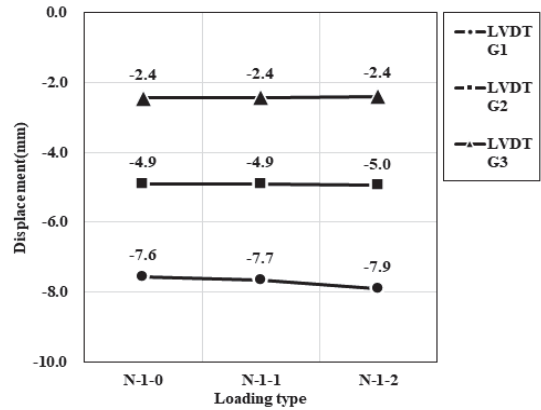


Fig. 5 Deflection results of N-bridge

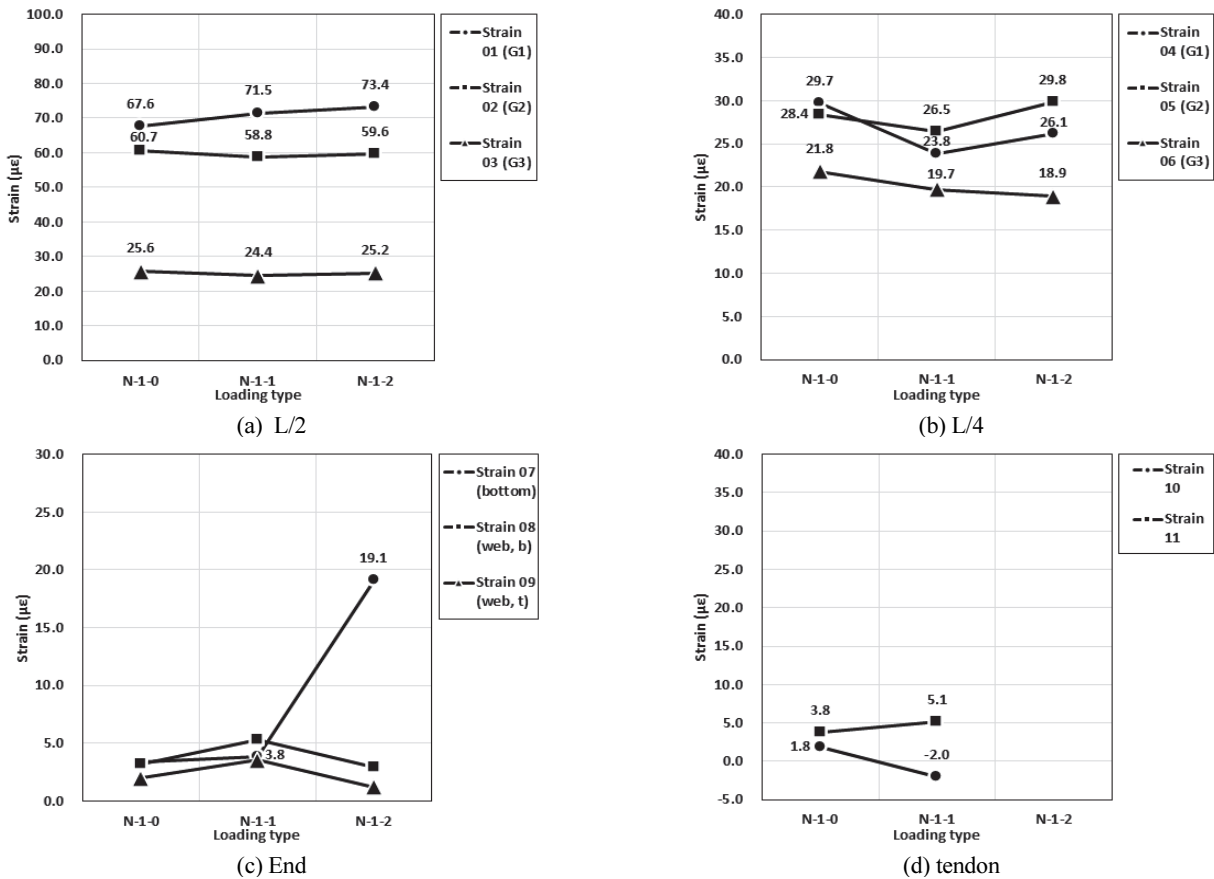


Fig. 6 Strain results of N-bridge

으나 중앙부 변형률 대비 26% 수준으로 거동에 미치는 영향이 작은 것으로 나타났다. 이외의 단부 콘크리트 변형률의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

긴장재 변형률을 Fig. 6(d)에 나타내었다. 긴장재 절단 시 긴장력 변화를 측정하기 위해 부착된 것으로 2개의 스틸용 변형률 게이지의 변화는 없는 것으로 나타났다. 이는 상행 교량의 일부 정착구의 부식 등급이 6등급(FHWA, 2009; EX, 2018) 이상으로 노후에 따른 부식이 심각하였으며, 단부에서 긴장재가 절단되더라도 충분한 전달길이를 가지고 있기 때문으로 판단된다.

### 3.2 하행교량 실험 결과

#### 3.2.1 처짐

하행 교량의 긴장재 절단 단계별 처짐을 Fig. 7에 나타내었다. 처짐의 변화가 크지 않았던 상행 교량과는 다르게 하행 교량에서는 긴장재 절단 시 처짐이 지속적으로 증가하는 경향이 나타났다.

특히 최외측 거더(G1)의 첫 번째 긴장재 절단 시 처짐은 소폭 증가하였으나, 두 번째 긴장재 절단 시의 처짐 S-1-2(G1)은 2.73 mm으로 절단 전 S-1-0(G1)의 2.17 mm 대비 25.8% 증가

하여 상행 교량 보다 긴장재 절단의 영향이 크게 나타났다. 인접 거더인 G2 및 G3의 처짐 변화량은 크지 않았다. 다만, 긴장재 절단 전 처짐의 크기는 상행 교량 대비 G1은 28.7%, G2는 44.3%, G3는 88.7% 수준으로 긴장재 절단의 영향이 크게 작용하는 거더일수록 처짐값이 작게 측정되었다. 이는 두 교량 사이에 13년의 공용기간 차이에서 발생한 상행 교량의 노후화에 따른 결과라 판단된다.

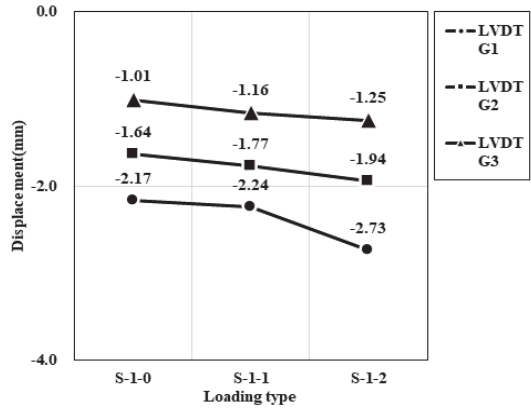
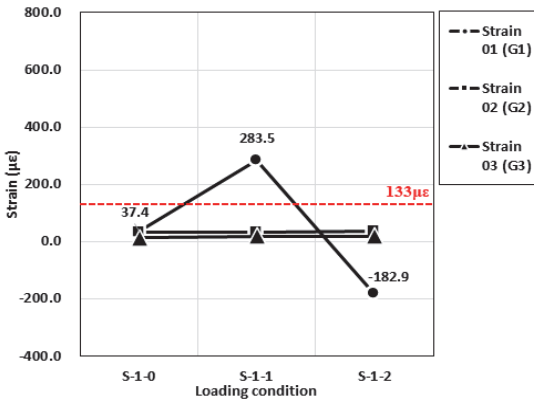
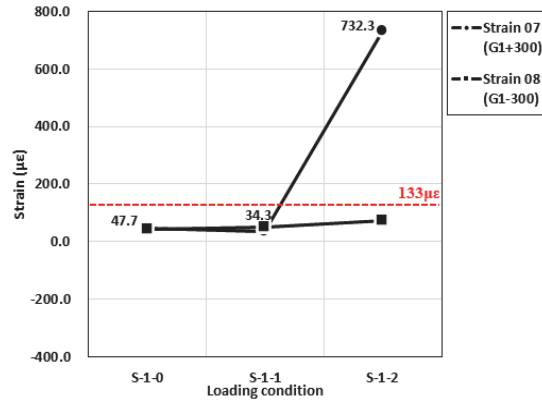


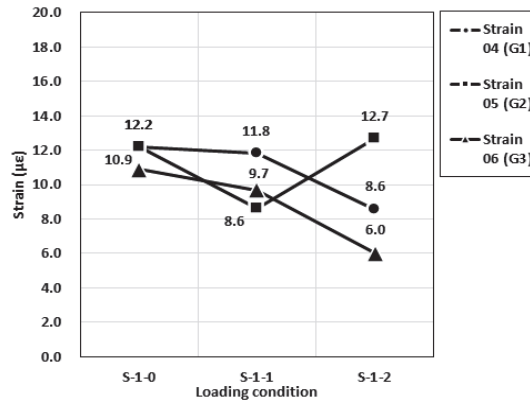
Fig. 7 Deflection results of S-bridge



(a) L/2



(b) L/2 ± 300mm



(c) L/4

Fig. 8 Strain results of S-bridge

### 3.2.2 변형률

하행(S) 교량의 콘크리트 변형률을 Fig. 8에 나타내었다. 거더 중앙부에서 측정된 콘크리트 변형률 중 긴장재가 절단된 최외측 거더(G1)은 각 단계별로 큰 변형률의 변화가 나타났다. Fig. 8(a)의 첫 번째 긴장재 절단 후 S-1-1(01, G1)의 변형률은 283.5  $\mu\epsilon$ 으로 절단 전 S-1-0(01, G1)의 37.4  $\mu\epsilon$  보다 약 7.6배 증가하였다. 이후 두 번째 긴장재 절단 후의 변형률 S-1-2(01, G1)의 변형률은 -182.9  $\mu\epsilon$ 으로 응력이 해소되었다. Fig. 8(b)에 중앙부에서  $\pm 300$  mm 떨어진 위치의 변형률을 나타내었다. 두 번째 긴장재가 절단된 후인 S-1-2(07, G1)의 변형률은 732.3  $\mu\epsilon$ 으로 긴장재 절단 전인 S-1-0(07, G1) 47.7  $\mu\epsilon$  대비 15배 이상 급증하였다. 이는 첫 번째 절단 이후 중앙부에서 발생한 균열이 두 번째 절단 이후 L/2+300 mm 근처로 진전하면서 변형률이 크게 증가한 것으로 판단된다. Fig. 8(c)의 L/4 지점의 변형률은 큰 변화가 없는 것으로 확인되었다.

Table 2에 하행 교량의 긴장재 절단 시의 콘크리트 변형률을 나타내었다. 긴장재 절단 인접 거더인 G2 및 G3의 변형률은 절단 후 하중 재하 시 보다 작은 값이 나타났으나, 긴장재 절단 거더인 G1의 변형률은 첫 번째 절단 시 337.2  $\mu\epsilon$ , 두 번째 절단 시 1008.3  $\mu\epsilon$ 으로 절단 전 하중이 재하된 S-1-0(01, G1) 37.4  $\mu\epsilon$  대비 약 9배, 27.0배 증가하였다. 콘크리트 교량의 균열 발생 변형률은 식(1)의 휨인장강도를 통해 구할 수 있으며, 하행 교량의 경우 설계기준압축강도 40MPa을 기준으로 133  $\mu\epsilon$ 이다. 즉, 하행 교량의 경우 부식에 의해 긴장재가 절단되면 거더 하면에 균열이 발생함을 알 수 있으며, 긴장재 절단 시에 균열이 더 크게 나타날 가능성이 높다.

$$f_r = 0.63 \sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

하행 교량 실험 결과 긴장재 절단 이후 균열 발생 가능한 수

**Table 2** Concrete strain of S-bridge when tendon cutting(Choi, 2019)

Cutting	Concrete strain at L/2 ( $\mu\epsilon$ )		
	G1	G2	G3
First tendon	337.2	11.9	14.3
Second tendon	1008.3	14.7	9.5

**Table 3** Concrete strain of G1 girder when loading G2 girder

Cutting	G1 girder			
	N-bridge	ratio	S-bridge	ratio
Before cutting	29.2	-	19.4	-
1 <sup>st</sup> tendon	32.2	1.10	66.7	3.44
2 <sup>nd</sup> tendon	31.6	1.10	66.2	3.41

준의 콘크리트 변형률이 발생 하였고, 이는 긴장재 절단 거더 외의 인접거더에 하중 재하 시 유의미한 변화가 있을 것으로 판단된다. Table 3에 2열 거더(G2) 재하 시 최외측 거더(G1)의 콘크리트 변형률을 긴장재 절단 전 변형률 값과 비교하였다. 상행(N) 교량의 경우 변형률 값은 1.1배 소폭 증가하였으나, 하행(S) 교량의 경우 평균 3.43배 증가하였다. 이는 하행 교량이 상행 교량 대비 상대적으로 계층값이 작은 것을 고려하면 큰 변화라 판단되며, 중앙부 긴장재 절단이 미치는 영향이 전체 교량 구조에 미치는 영향이 크다는 것을 확인하였다.

## 4. 결론

본 연구에서는 실제 PSC I 거더교의 긴장재 절단 후 재하 실험을 수행하였으며, 처짐 및 변형률 변화가 가장 큰 최외측 거더에 하중이 재하될 경우를 분석하였다.

단부 긴장재가 절단될 경우, 절단 전 대비 처짐은 최대 4%, 콘크리트 변형률은 최대 8.6% 증가하였다. 중앙부 긴장재가 절단된 경우에는 절단 전 대비 처짐은 최대 25.5%, 콘크리트 변형률은 중앙부 기준으로 약 760%, 중앙부+300 mm 기준으로 약 1500% 증가하였다. 노후화가 심한 상행 교량의 처짐 및 콘크리트 변형률의 절대값이 하행 교량 대비 더 큰 것을 고려한다면, 긴장재의 손상 위치가 교량의 거동에 더 큰 영향을 끼치는 것을 확인할 수 있다. 즉, 긴장재 부식이 중앙에 가까울 수록 거더의 성능은 크게 저하된다.

중앙부 긴장재가 손상된 경우에는 손상이 발생하지 않은 인접 거더에 하중이 재하될 경우에도 긴장재 손상 거더의 콘크리트 변형률의 변화량이 크게 나타났다. 다만, 교량 거더·바닥판·가로보 등의 결합에 따른 영향으로 발생한 변형률의 크기가 균열 발생 변형률 이하이기 때문에 전체 교량의 구조적 성능은 유지 가능할 것으로 판단된다.

중앙부 긴장재가 절단된 후 하중 재하 시 처짐의 최대 변화량은 0.56 mm이며, 변형률은 콘크리트의 균열 발생 변형률을 초과하여 균열이 발생하는 것으로 나타났다. 특히 긴장재가 절단되는 순간의 변형률은 긴장재 절단 전 하중이 재하된 경우와 비교하여 첫 번째 절단 시 약 9배, 두 번째 절단 시 약 27배 증가하는 것으로 나타났다. 이는 긴장재 부식에 따른 손상 발생 시와 발생 후의 균열폭 측정에 차이가 나타날 가능성을 내포하고 있다. 따라서 PSC I 거더교의 모니터링 시스템 구축 시 콘크리트 변형률의 변화를 계측하는 것이 효율적일 것으로 판단된다. 또한 전체 교량에 대한 모니터링 시스템 구축은 어렵기 때문에 지속적인 PSC I 거더교의 균열 상태에 대한 모니터링 및 후속 연구 등을 통해 균열과 긴장재 손상과의 상관관계를 분석하고 긴장재의 손상을 고려한 상태평가가 이루어 질 수 있도록 균열폭 기준을 제시하기 위한 연구가 필요할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국도로공사 도로교통연구원의 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

1. Korea Expressway Corporation Research Institute (2021), Development of Maintenance Plan on PSC Box Girder Bridges, Korea Expressway Corporation Research Institute, Hwaseong, 1-28 (in Korean).
2. Vereecken, E., Botte, W., Lombaert, G., and Caspeele, R. (2021), Assessment of corroded prestressed and post-tensioned concrete structures: A review, *Structural Concrete*, Wiley, 22(5), 2556-2580.
3. Hartt, W., and Lee, S. K. (2016), Projecting Corrosion Induced Bridge Tendon Failure Resulting from Deficient Grout: Part I – Model Development and Example Results, *Corrosion*, Allen Press, 72(8), 991-998.
4. Jeon, C. H., Lee, J. B., Lon, S., and Shim, C. S. (2019), Equivalent material model of corroded prestressing steel strand, *Journal of Materials Research and Technology*, Elsevier, 8(2), 2450-2460.
5. Darmawan, M. S., and Stewart, M. G. (2007a), Spatial time-dependent reliability analysis of corroding pretensioned prestressed concrete bridge girders, *Structural Safety*, Elsevier, 29(1), 16-31.
6. Darmawan, M. S., and Stewart, M. G. (2007b), Effect of pitting corrosion on capacity of prestressing wires, *Magazine of Concrete Research*, ICE, 59(2), 131-139.
7. Li, F., Yuan, Y., and Li, C. Q. (2011), Corrosion propagation of prestressing steel strands in concrete subject to chloride attack, *Construction and Building Materials*, Elsevier, 25(10), 3878-3885.
8. Lu, Z. H., Li, F., and Zhao, Y. G. (2016), An Investigation of Degradation of Mechanical Behaviour of Prestressing Strands Subjected to Chloride Attacking, *Proceedings of the 5th International Conference on the Durability of Concrete Structures*, Purdue University Press, Indiana, 57-65.
9. Jo, S. D., Kwon, S. H., Lee, Y., and Kim, C. Y. (2017), Statistical Analysis on Corrosion and Estimation of Probability on Fracture for Corroded Strand of a Post-Tensioned Bridge on Service, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 29(6), 545-553 (in Korean).
10. Vecchi, F., Franceschini, L., Tondolo, F., Belletti, B., Sánchez Montero, J., and Minetola, P. (2021), Corrosion morphology of prestressing steel strands in naturally corroded PC beams, *Construction and Building Materials*, Elsevier, 296, 123720.
11. Zhang, W., Li, C., Gu, X., and Zeng, Y. (2019), Variability in cross-sectional areas and tensile properties of corroded prestressing wires, *Construction and Building Materials*, Elsevier, 228, 116830.
12. Rashetnia, R. Ghasemzadeh, F., Hallaji, M., Pour-Ghaz, M. (2018), Quantifying prestressing force loss due to corrosion from dynamic structural response, *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, 443, 129-137.
13. Kim, G. Y., and Seo, D. W. (2018), Application of Acoustic Emission Technique for Bridge Cable Monitoring, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 22(4), 121-125 (in Korean).
14. Coronelli, D., Castel, A., Vu, N. A., and François, R. (2009), Corroded post-tensioned beams with bonded tendons and wire failure, *Engineering Structures*, Elsevier, 31(8), 1687-1697.
15. Dai, L., Wang, L., Bian, H., Zhang, J., Zhang, X., and Ma, Y. (2019), Flexural Capacity Prediction of Corroded Prestressed Concrete Beams Incorporating Bond Degradation, *Journal of Aerospace Engineering*, ASCE, 32(4), 04019027.
16. Kim, J. T., Park, J. H., Hong, D. S., and Na, W. B. (2008), Hybrid Damage Monitoring Scheme of PSC Girder Bridges using Acceleration and Impedance Signature, *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, 28(1A), 135-146 (in Korean).
17. Gou, T., Chen, Z., Liu, T., and Han, D. (2016), Time-dependent reliability of strengthened PSC box-girder bridge using phased and incremental static analyses, *Engineering Structures*, Elsevier, 117, 358-371.
18. Kim, H. J., Ji, S. G., Kim, H. K., Kim, P. S., Jung, J. S., and Lee, M. J. (2018), Evaluation of Tension of PSC Box Girder Bridges Using Risk Matix, *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, 19(5), 053-060 (in Korean).
19. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM). (2017), Inspection Guidelines for Bridge Post-Tensioning and Stay Cable Systems Using NDE Methods(NCHRP Research Report), The National Academies Press., Washington, D.C. 1-38.
20. National Highways (NH). (2020), CS 465 Management of post-tensioned concrete bridges(Design Manual for Roads and Bridges), National Highways, Guildford, 1-39.
21. Federal Highway Administration (FHWA). (2013), Guidelines for Sampling, Assessing, and Restoring Defective Grout in Prestressed Concrete Bridge Post-Tensioning Ducts, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1-95.
22. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2018), Detailed Guidelines for the Safety and Maintenance of Facilities (Part of Safety Inspection and Precise Safety Diagnosis for Bridge), Korea Authority of Land & Infrastructure Safety, Jinju, 1-29 (in Korean).
23. Federal Highway Administration (FHWA). (2009), Effect of Voids in Grouted Post-Tensioned Concrete Bridge Construction Inspection and Repair Manual for External Tendons in Segmental, Post-Tensioned Bridges, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 15.
24. Korea Expressway Corporation Research Institute(EX). (2018), A Study on Structural Safety Evaluation of Prestressed Concrete Bridges According to Damage of Prestressing Tendons, Korea Expressway Corporation Research Institute, Hwaseong, 1-86 (in Korean).
25. Choi, J. W., and Kim, K. H. (2019), Behavior Characteristics of PSCI Girder Bridges under Damage of Internal Tendon, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Korea Concrete Institute, Seoul, 71-72 (in Korean).

Received : 03/18/2024  
Revised : 03/20/2024  
Accepted : 03/24/2024

---

**요 지** : 프리스트레스트 콘크리트(PSC) 교량은 긴장재 부식과 파단에 취약하며, 특히 내부 포스트텐션 형식을 사용하는 구조물은 내부 긴장재 조사의 한계로 유지관리에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 고속도로 교량의 약 35%를 차지하는 PSC I 거더교의 트럭 재하 실험을 통하여 긴장재 손상에 따른 실제 거동을 분석하고 유지관리 전략을 제시하고자 하였다. 대상 PSC I 거더교는 고속도로의 폐교량이며, 상·하행 교량의 공용기간은 각각 33년, 20년이다. 단부 및 중앙부 등 긴장재 손상 위치와 정적 및 동적, 거더별 하중 재하 방법에 따라 처짐과 콘크리트 변형률을 계측하였다. 교량의 노후화와 관계없이 긴장재 손상이 거더 중앙부에 가까울수록 교량의 구조 성능은 감소하였다. 트럭 하중이 긴장재 절단이 발생한 거더에 근접될수록 거동의 변화가 증가하였다. 긴장재 절단 인접거더에 하중이 재하 될 경우 교량 전체 구조계의 영향으로 구조적 성능은 유지 가능할 것으로 판단된다. 거더 중앙부 긴장재가 절단된 경우 처짐의 변화량은 육안 관찰이 어려운 수준인 반면, 절단 위치의 콘크리트 변형률은 균열발생 변형률을 초과하였다. 따라서 향후 PSC I 거더교의 모니터링 및 유지관리 시에 콘크리트 변형률 또는 균열에 중점을 두는 것이 효율적이라 판단된다.

**핵심용어** : 긴장재, 손상, PSC I 거더교, 유지관리

---