

프리스트레스트 콘크리트 박스 거더 교량의 프리스트레스 손실 추정에 관한 연구

A Study on the Estimation of Prestress Losses in Prestressed Concrete Box Girder Bridges

오 병 환* 양 인 환** 김 지 상***
Oh, Byung-Hwan Yang, In-Hwan Kim, Ji-Sang

Abstract

This paper aims at estimating instantaneous prestress losses by measuring the actual prestress forces in prestressed concrete (PSC) box girder bridges. Measurement were taken to study initial prestress losses such as friction losses and slip losses. A new strain gauge system was developed to measure strains in internal tendons. The system was installed on a total of 20 tendons in a PSC box girder bridges. The variation of prestress forces were monitored during prestressing tendon and after prestress transfer. The prestress losses are also calculated including friction losses and slip losses. The measured data were compared with the theoretical values. The result shows that the measured prestress forces agree well with the theoretical values. It is shown that prestress force of each strand in the same tendon is a bit different. This study also shows that prestress losses of continuity tendons during prestress transfer are significantly different each other, which results from the variety of buttress location and tendon profile. The present study provides realistic information on the estimation of actual prestress forces and losses in PSC box girder bridges.

keywords : Prestressed Concrete, Box Girder Bridge, Prestress, Instantaneous Loss, Friction Loss, Slip Loss, Strain Gauge System

* 정희원, 서울대학교 토목공학과 교수, 공학박사
** 정희원, 대림산업(주) 기술연구소 선임연구원, 공학박사
*** 서경대학교 토목공학과 교수, 공학박사

● 본 논문에 대한 토의를 2001년 6월 30일까지 학회로 보내
주시면 2001년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

프리스트레스드 콘크리트(PSC) 박스 거더 교량은 교량 상부구조물의 주요 가설단계마다 프리스트레스 힘을 도입한다. 구조체에 도입된 프리스트레스 힘은 여러 가지 원인에 의해 손실이 발생하며, 프리스트레스드 콘크리트 교량의 정밀한 구조 거동의 예측과 유지관리를 위해서는 구조물에 작용하는 프리스트레스 힘의 정밀한 산정이 필요하다. 설계시의 프리스트레스와 구조물에 도입되는 프리스트레스가 다를 경우, 구조물의 공용중에 추가의 긴장 작업이 필요할 수도 있다⁽²⁾.

PSC 구조물의 프리스트레스 손실 예측에 관한 다수의 연구가 진행되었다. 문제길 등⁽³⁾은 프리스트레스의 마찰손실에 관한 연구를 수행하였다. 정배근 등⁽⁴⁾은 30m 크기의 실물 크기의 PSC 거더에서 프리스트레스의 마찰 손실을 연구한 바 있다. Shenoy와 Frantz⁽⁵⁾ 및 Pessiki 등⁽⁶⁾은 수십년의 공용기간이 경과한 프리스트레스드 콘크리트 거더의 프리스트레스의 추정 연구를 수행하였다. Naaman과 Hamza⁽⁷⁾는 부분 긴장된 고강도 콘크리트 보에서의 프리스트레스 손실 연구를 수행하였으며, Burns 등⁽⁸⁾은 비부착된 연속보에서의 프리스트레스 손실 연구를 수행하였다. Sharif 등⁽⁹⁾은 프리스트레스드 콘크리트 합성보에서의 시간에 따른 프리스트레스 손실 연구를 하였으며, Tassi와 Rozsa⁽¹⁰⁾는 캔틸레버 방식으로 가설되는 교량의 프리스트레스 힘 산정 방법을 제안한 바 있다. 또한, Wollmann 등⁽¹¹⁾은 외부 강선에 의해 긴장되는 콘크리트 박스 거더 교량의 현장 계측 연구를 수행하였으며, Saiidi 등⁽¹²⁾은 프리스트레스의 시간에 따른 손실에 관한 연구를 수행하였다. 또한, Airrellaga⁽¹³⁾는 외부긴장 방식의 PSC 박스 거더 교량의 프리스트레스 손실을 추정하기 위한 새로운 계측시스템을 제안한 바 있다.

그러나, 기존의 대부분의 연구는 실내에서의 부재 실험을 통한 프리스트레스 손실 측정과 프리스트레스 손실을 산정하기 위한 해석기법에 관하여 주로 이루어졌으며, 현장의 실제 교량 구조물에서의 프리스트레스 손실 추정과 그 특성에 관한 연구는 미비한 실정이다.

또한, 프리스트레스의 초기 손실에 관한 연구는 마찰 손실에 대하여 주로 수행되었으며^(3,4), 상대적으로 정착장치의 미끌어짐에 의한 손실에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 실제의 PSC 박스 거더 교량 시공시의 텐던 긴장력의 현장 측정을 통하여 프리스트레스의 초기 손실 추정 연구를 수행하고자 하였다. 먼저, 현장에서 프리스트레스 힘의 측정이 용이한 시스템으로써 나선형 변형률 게이지 시스템을 제안하였다. 제안된 측정 시스템을 이용하여 PS 강선의 긴장단과 고정단에서 프리스트레스 힘을 측정하였다. 측정 결과와 이론값의 비교 분석을 토대로 마찰 손실에 의한 PS 강선 고정단의 프리스트레스의 영향과 국내 마찰 손실에 대한 설계 기준의 타당성을 평가하고자 하였다. 또한, 정착 쇄기의 미끌어짐으로 인한 PS 강선 긴장단의 프리스트레스의 영향과 동일한 텐던 내의 서로 다른 강연선에 도입되는 프리스트레스의 특성 등을 연구하였다.

2. 측정 센서 시스템

텐던 덕트 내에 매설되어 있는 PS 강재의 변형률 또는 힘을 특히 현장조건하에서 정확히 측정하기는 힘들다. PS 강재에 도입된 프리스트레스 힘을 측정하기 위한 대부분의 실내 및 현장연구에서는 전기저항식 변형률 게이지, 용접형 진동현식 변형률 게이지 또는 로드셀을 사용하여 왔다. 전기저항식 변형률 게이지와 용접형 진동현식 게이지는 텐던의 긴상과정에서 강연선 사이의 접촉으로 인한 파손 또는 용접 파손 등이 발생할 염려가 있으며, 로드셀은 높은 비용으로 인해 경제적인 제약을 받는다.

본 연구에서는 프리스트레스 힘 측정센서로써 20개의 나선형 변형률 게이지 (spiral strain gauge)를 사용하였다. 나선형 변형률 게이지는 캐나다의 Laval 대학교⁽¹⁴⁾에서 고안되었으며, Fig. 1에 나타난 바와 같이 니켈-크롬 성분의 전기저항식 현과 현의 양 끝단의 앵기로 구성되며, 길이는 약 50cm이다. 4개의 전기저항식 현은 7연선의 소선과 소선 사이의 꼴을 따라 나선형으로 위치하며 딱딱한 고무 재질의 앵커에 정착된다.

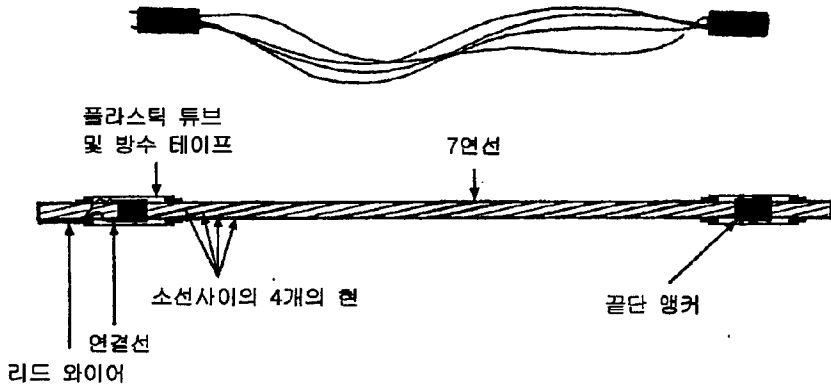


Fig. 1 나선형 변형률 게이지

텐던 긴장시 현의 전기 저항값은 변하게 되며, 전기 저항값의 변동을 통하여 프리스트레스를 측정한다. 긴장시 적절한 저항값을 반영하기 위해 현은 초기에 느슨하지 않도록 설치한다. 앵커의 안쪽 면은 7연선의 바깥 둘레의 형태와 동일하며 공업용 강력 접착제에 의해 7연선에 부착된다. 텐던 긴장시의 틱트 내의 7연선 사이의 접촉으로 인한 앵커 파손을 방지하기 위해 플라스틱 보호판으로 앵커를 감싼다. 또한, 플라스틱 보호판은 앵커 부위에서의 현과 리드 와이어(lead wire)와의 연결부위를 보호하는 역할도 한다. 최종적으로 방수 테이프로 플라스틱 보호판을 둘러싼다.

3. 이론적 프리스트레스의 초기 손실

PS 강재의 긴장시 PS 강재와 쉬스파 사이의 마찰로 인해 PS 강재에는 프리스트레스 손실이 발생한다. 이러한 마찰 손실은 곡률마찰과 과상마찰 효과를 고려하여 추정되며, 프리스트레스의 마찰에 의한 손실은 다음식과 같이 유도된다⁽¹⁴⁾.

$$P_x = P_0 e^{-(\mu\alpha + kl)} \quad (1)$$

여기서, P_x = 긴장단으로부터 거리 x 인 곳에서의 프리스트레스 힘; P_0 = 긴장단에서의 긴장재의 프리

스트레스 힘; μ = 각변화 1 라디안에 대한 곡률 마찰계수; α = 각변화 (radian); k = 긴장재의 단위 길이에 대한 과상 마찰계수; l = 긴장단으로부터의 텐던의 길이를 나타낸다. 구조물에 사용된 덕트는 금속 쉬스로 이루어져 있다. 이에 따라 본 연구의 이론적 프리스트레스 초기 손실 산정시에는 도로표준시방시⁽¹⁾ 및 AASHTO 기준⁽⁶⁾에서 권장하고 있는 곡률마찰계수(μ)=0.30/라디안 및 과상마찰계수(k)=0.0066/m 을 적용하였다.

PS 강선을 긴장단에서 정착하는 동안 정착장치의 췌기는 미끌어짐 현상이 발생된다. 정착장치의 미끌어짐으로 인한 긴장력 감소 영향범위 및 긴장력 감소량은 각각 다음식과 같이 유도된 바 있다⁽¹⁴⁾.

$$l_{set} = \sqrt{\frac{\Delta_{set} E_{ps} A_{ps}}{\Delta p}} \quad (2a)$$

$$\Delta P = 2 \Delta p l_{set} \quad (2b)$$

여기서, Δ_{set} = 췌기의 미끌어짐 량

E_{ps} = PS 강재의 탄성계수

A_{ps} = PS 강재의 단면적

$\Delta p = (P_0 - P_L)/L$ = 단위길이당 마찰 손실

P_0 = 텐던의 정착전 긴장단의 프리스트레스 힘

P_L = 텐던의 고정단의 프리스트레스 힘

L = 텐던의 길이를 나타낸다.

정착장치의 미끌어짐으로 인한 프리스트레스 손실은 식 (2)를 사용하여 이론적으로 추정할 수 있으며, 본 연구에서는 썰기의 미끌어짐량 Δ_{sl} = 6mm를 사용한다. 본 측정 구조물의 긴장방식은 포스트텐션 방식이며, 콘크리트 정착부를 받침대 역할로 하여 텐던을 긴장한다. 따라서, 텐던의 긴장력은 콘크리트 부재가 단성변형한 후에 측정되기 때문에 콘크리트의 단성변형으로 인한 프리스트레스의 손실은 없는 것으로 가정하였다.

4. 프리스트레스 힘의 현장 측정

4.1 센서의 설치

측정 대상 교량은 포스트텐션 방식에 의한 프리캐스트 세그멘탈 공법에 의해 시공되는 PSC 박스 거더 교량이며, 경간의 길이는 50m이다. 박스 거더에는 상부슬래브에 캔틸레버 텐던 (cantilever tendon)을 위한 덕트와 하부슬래브에 연속텐던 (continuity tendon)을 위한 덕트기 각각 위치한다 (Fig. 2). 덕트에는 16가닥 또는 19가닥의 강연선이 배치된다. 강연선은 7연선으로써 공칭직경이 12.7mm (0.5in.)의 KSD 7002에 규정되어 있는 SWPC 7B 종류이다.

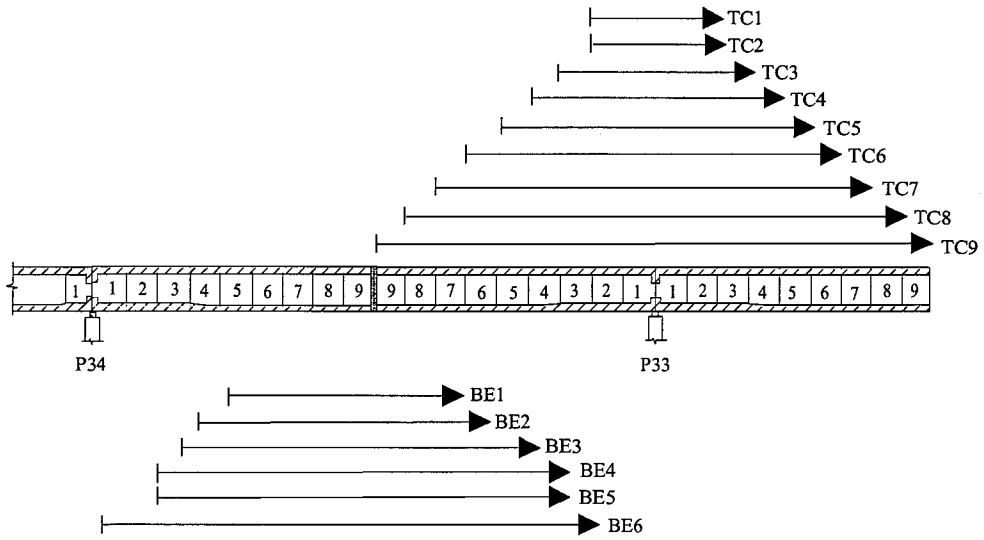
계측센서를 설치한 지간은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 구조물의 교각 P33을 중심으로 하는 캔틸레버 시공구간 및 교각 P33과 P34사이에 위치하는 지간이다. 나선형 변형률 게이지의 설치는 캔틸레버 텐던 및 연속텐던 등 두 부분으로 나뉘어 수행되었으며, 캔틸레버 텐던에 10개 및 연속 텐던에 10개를 각각 설치하였다. 이때, 센서의 일부는 긴장단에 설치하고 일부는 고정단에 설치하였으며, 각 정착단 연단으로 부터 약 20~40cm 정도에 위치하도록 강연선에 부착하였다.

먼저, 캔틸레버 시공시 상부슬래브 텐던에서의 강연선 한계에 작용하는 긴장력을 측정하기 위해서 각 시공단계별로 10개의 나선형 변형률 게이지를 사용하였다. 캔틸레버는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이, 교각에 위치하는 1번 세그먼트로 시작하여 지간중양부의 9번 세그먼트까지 교각을 중심으로 좌우 대칭으로 각각 가설된다. 따라서 캔틸레버의 각 주요 시공 공정단계마다의 상부슬래브 텐던에서의 긴장력을 측정하기 위해서 나선형 변형률 게이지를 2번 세그먼트 상부슬래브의 텐던 TC1의 긴장단에 2개, 5번 세그먼트의 텐던 TC5의 긴장단 및 고정단에 각각 2개씩 그리고 9번 세그먼트의 텐던 TC9의 긴장단 및 고정단에 각각 2개씩을 설치하였으며, Table 1에 캔틸레버 텐던에 설치된 변형률 게이지의 위치를 나타내었다.

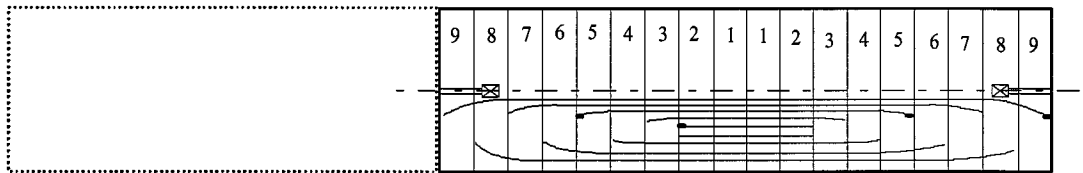
한편, 점함 세그먼트 타설 후 캔틸레버 연결시의 하부슬래브의 텐던은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 텐던 BE6부터 시작하여 BE1까지 순차적으로 각각 긴장된다. 따라서 각 시공 공정단계별로 하중을 측정하기 위하여 텐던 BE1부터 텐던 BE6까지의 긴장단과 텐던 BE1, BE2, BE3 및 BE6의 고정단에 각 1개씩 합계 10개의 나선형 변형률 게이지를 설치하였다. Table 1에 하부슬래브의 연속텐던에 설치된 나선형 변형률 게이지의 위치를 나타내었다.

Table 1 텐던의 센서 설치 위치

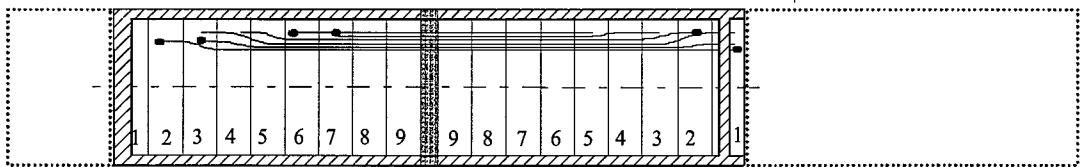
텐던 구분	설치 위치	설치 갯수	비고
TC1	긴장단	2	
TC5	긴장단 고정단	2 2	1개 파손
TC9	긴장단 고정단	2 2	2개 파손 1개 파손
BE1	긴장단 고정단	1 1	파손
BE2	긴장단 고정단	1 1	파손
BE3	긴장단 고정단	1 1	파손
BE4	긴장단	1	파손
BE5	긴장단	1	
BE6	긴장단 고정단	1 1	



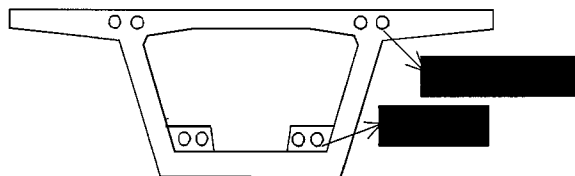
(a) 단면도와 텐던 구분



(b) 케이블 트레이 텐던과 센서 위치



(c) 연속 텐던과 센서 위치



(d) 박스 거더 단면

Fig. 2 텐던 배열과 센서 위치

4.2 프리스트레스 힘의 측정 방법

텐던은 긴장재의 항복강도 또는 극한강도를 고려하여 구조물 설계시 초기 긴장력을 결정한다. 잭킹 램 (jacking ram)의 유압단위 기준으로 텐던 TC1은 460bar까지 긴장하며, 기타 텐던은 550bar까지 긴장한다. 텐던 TC1은 7연선 16가닥으로 구성되며, 기타 텐던은 7연선 19가닥으로 구성된다. 이에 따라, 초기 긴장시 텐던 TC1의 7연선 1가닥의 인장력은 14.69tonf을 작용하며, 기타 텐던의 7연선 1가닥의 인장력은 14.70tonf을 작용하고자 하였다. 텐던의 긴장력, 길이 및 텐던 전체의 길이에 따른 각변화를 Table 2에 나타내었다. 텐던의 긴장은 1단 긴장을 수행하였으며, 텐던을 긴장하는 동안 특정 압력단계마다 긴장단에서 인장력을 측정하였다. 잭킹 램에서 소요의 유압에 도달후 즉, 텐던의 정착 전에 고정단에서 프리스트레스 힘을 측정하여 마찰손실에 의한 손실 특성을 분석하고자 하였다. 또한, 텐던의 정착 후에 긴장단에서 프리스트레스 힘을 측정하여, 썩기의 미끌어짐에 의한 손실 특성을 분석하고자 하였다.

본 연구에서는 측정중 전기신호의 무응답 및 일관성이 떨어던 자료를 나타내는 센서를 파손된 것으로 고려하였다. 캔틸레버 텐던에 설치된 10개의 나선형 변형률 게이지 중에서, Table 1에 나타낸 바와 같이 긴장도중 텐던 TC5의 긴장단에서 1개, 텐던 TC9의 긴장단에서의 2개 및 고정단에서 1개 등 4개가 파손되었다. 또한, 연속 텐던에 설치된 10개의 나선형 변형률 게이지 중에서, 긴상도중 텐던 BE1과 BE2의 고정단에서 각각 1개, 텐던 BE3와 BE4의 긴장단에서 각각 1개 등 4개가 파손되었다.

Table 2 텐던의 특성

텐던 구분		설계 긴장력 (tonf)	텐던 길이 (m)	텐던의 각변화 (radian)
캔틸레버 텐던	TC1	14.69	8.8	0.
	TC5	14.70	26.5	0.4992
	TC9	14.70	49.5	0.4992
연속 텐던	BE1	14.70	20.6	0.0690
	BE2	14.70	29.3	0.3370
	BE3	14.70	38.0	0.4775
	BE5	14.70	43.8	0.4254
	BE6	14.70	46.7	0.3133

나선형 변형률 게이지의 현은 전기저항식의 센서 역할을 하며, 텐던의 신장량에 따른 전기저항의 변화를 통해 변형률을 측정한다. 나선형 변형률 게이지는 7연선의 소선과 소선사이의 굵을 따라 약간 비스듬히 나선 형태로 위치하고 있다. 7연선의 축방향은 텐던의 축방향과 약 10° 정도 사잇각을 이루므로, 나선형 변형률 게이지의 변형률에 수정계수 1.03을 곱하여 텐던의 축방향 변형률을 산출한다⁽¹²⁾. 산출된 축방향 변형률에 텐던의 탄성계수값을 사용하여 응력 또는 프리스트레스 힘을 산출할 수 있다.

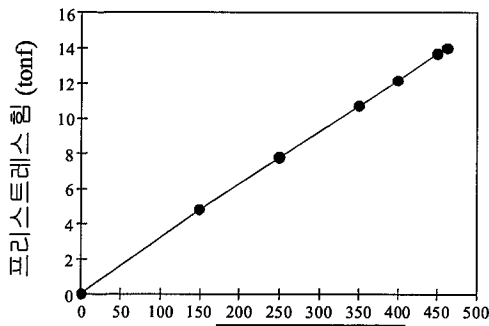
5. 측정결과 및 분석

5.1 텐던의 긴장동안의 프리스트레스 힘 측정

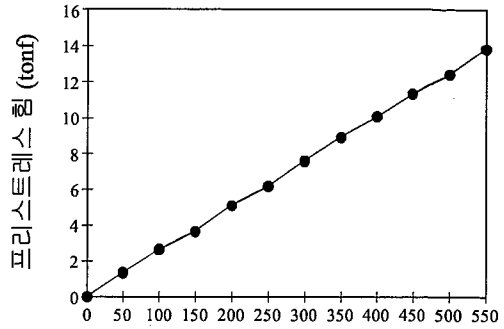
텐던의 긴장시에는 유압식의 긴장재크를 이용하여 50bar씩 단계적으로 프리스트레스 힘을 도입한다. 이때, 긴장시의 각 프리스트레스 힘의 도입 단계마다 텐던의 정착선까지 나선형 변형률 게이지에서 측정된 프리스트레스 힘을 Fig. 3에 나타내었다.

변형률 게이지의 현 (Fig. 1 참조)이 느슨하게 설치된 경우, 긴장단계에 따라 측정되는 프리스트레스 힘 그래프의 직선 기울기는 일관성 있는 값을 나타내지 않을 수 있다. 즉, 초기 긴장단계에서의 직선의 기울기값과 후속 긴장단계에서의 직선의 기울기는 상이한 값을 나타낼 수 있다. 변형률 게이지에서 측정된 프리스트레스 힘과 잭킹 램에 도입된 유압과의 관계가 서로 다른 기울기를 갖는 직선의 조합 형태로 나타날 경우, 이는 보정되어야 한다. 이때의 보정방법은 후속 긴장단계에서의 직선의 기울기를 회귀분석을 통하여 산출한 후, 산출된 기울기를 갖는 직선이 그림의 원점을 통과하도록 상향이동한다⁽¹³⁾.

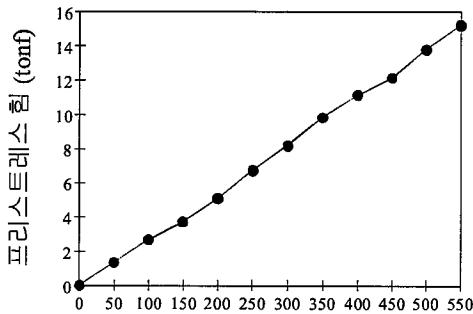
Fig. 3에서 잭킹 램에 도입된 유압과 나선형 변형률 게이지에서 측정된 프리스트레스 힘의 관계는 직선 형태이며, 이는 선형적인 관계를 나타내고 있다. 또한, 측정 센서의 효율성을 검토하기 위하여 텐던 TC1 및 텐던 BE1에 도입되는 인장력을 비교하였다. 텐던 TC1은 7연선 16가닥으로 구성되며, 텐던 BE1은 19가닥으로 구성되어 있다.



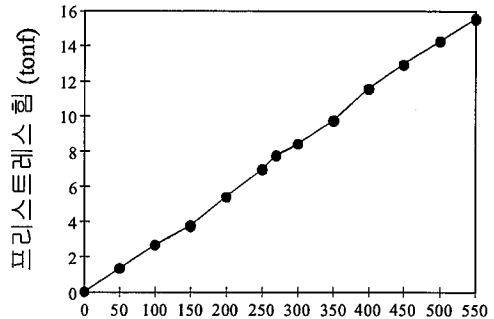
(a) 텐던 TC1의 긴장단



(b) 텐던 BE1의 긴장단



(c) 텐던 BE2의 긴장단



(d) 텐던 BE6의 긴장단

Fig. 3 텐던 긴장 동안의 측정결과

동일한 유압 조건에서 텐던 BE1의 7연선에 도입되는 프리스트레스 힘에 대한 텐던 TC1의 7연선에 도입되는 프리스트레스 힘의 비는 이론상으로, $P_{TC1}/P_{BE1} = (1/16)/(1/19) = 1.19$ 배의 관계가 성립한다. 실제로, 그림 3(a)에서 긴장작업시 450bar 단계에서 텐던 TC1의 프리스트레스 힘은 13.66tonf이며, 그림 3(b)에서 텐던 BE1의 프리스트레스 힘은 11.31tonf이다. 측정값의 비는 $13.66\text{tonf}/11.31\text{tonf} = 1.21$ 이며, 이는 이론값인 1.19와 유사한 값을 나타낸다. 따라서, 나선형 변형률 게이지를 이용하여 텐던에 도입되는 프리스트레스 힘을 효과적으로 측정할 수 있다고 사료된다.

5.2 긴장단 프리스트레스 힘의 이론값과 측정값의 비교 분석

텐던의 정착후 긴장단에서 측정한 강연선의 긴장력과 이론값을 비교하여 Table 3과 Fig. 4에 나타내었다. Table 3에서 긴장력의 측정결과와 이론값은 각 텐던마다 약간의 편차를 나타내고 있다. 긴장단에서의 이론값에 대한 측정값의 비는 93-111%를 나타내며, 두 값의 비의 최대 편차는 약 11% 정도까지도 발생 가능한 것으로 나타난다.

박스 거더의 바닥 슬래브에 배치되는 연속텐던에는 텐던의 정착전까지 동일한 설계긴장력 14.70tonf을 도입한다. 텐던 BE1, BE2, BE5 및 BE6의 정착후

Table 3 텐던정착후 긴장단에 도입된 프리스트레스 힘

텐던 구분	측정값 (tonf)	이론값 (tonf)	측정값/이론값 (%)
TC1-A	12.82	12.58	101.9
TC1-B	11.74	12.58	93.3
BE1	13.31	12.63	105.3
BE2	13.51	12.24	111.4
BE5	11.84	12.38	95.6
BE6	11.55	12.48	92.5

Table 4 췌기의 미끌어짐에 의한 프리스트레스 힘의 손실

텐던 구분	측정 프리스트레스 힘 (tonf)		손실률 (%)
	텐던 정착전	텐던 정착후	
TC1-A	13.97	12.82	8.2
BE1	13.84	13.31	3.8
BE2	15.24	13.51	11.4
BE6	15.54	11.55	25.7

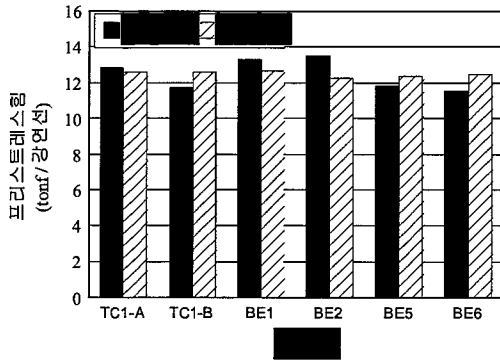


Fig. 4 긴장단에 도입된 프리스트레스 힘

프리스트레스 힘은 각각 13.31tonf, 13.51tonf, 11.84tonf 및 11.55tonf을 나타내고 있으며, 연속텐던의 정착후 프리스트레스 힘은 약 2ton정도 차이가 발생한다. 이는 캔틸레버 텐던에서 나타나는 현상과 마찬가지로, 텐던의 정착전 긴장단에서의 설계 프리스트레스 힘은 동일할지라도, 정착후의 프리스트레스 힘은 다른 값을 나타낸다. 이는 텐던의 정착과정에서 췌기의 미끌어짐 효과에 의해 각 텐던의 프리스트레스 손실량이 다르게 나타나기 때문이다.

또한, 텐던 TC1의 서로 다른 7연선의 긴장단에서 측정된 프리스트레스 힘은 차이를 나타낸다. 텐던 TC1의 2개의 7연선에서 측정된 프리스트레스 힘은 각각 12.82tonf 및 11.74tonf로써 9% 정도의 편차를 나타내고 있다.

췌기의 미끌어짐 효과에 의해 발생하는 프리스트레스 힘의 손실량을 산정하기 위해 텐던의 정착전과 정착후에 측정된 프리스트레스 힘을 Table 4에 나타내었다. 박스 거더의 바닥슬래브 부분에 위치하는 연속

텐던 BE1, BE2 및 BE6의 프리스트레스 손실률은 각각 3.8%, 11.4% 및 25.7% 발생하는 것으로 나타난다. 췌기의 미끌어짐에 의한 손실은 식 (2)에서 보는 바와 같이 PS 강재의 동일한 단성계수, 단면적 및 미끌림량 조건하에서는 궁극적으로 Δp (단위길이당 마찰 손실)에 의해 영향을 받는다. 박스 거더의 상부슬래브에 배치되는 캔틸레버 텐던과 달리, 연속텐던은 바닥슬래브의 버트레스에 정착된다. 다양한 프리스트레스 손실률은 버트레스의 설치에 의한 상이한 텐던의 배치 형상 및 텐던 길이 차이에서 기인하는 것으로 사료된다. 따라서 PS 박스 거더의 설계시, 프리스트레스의 손실을 최소화할 수 있도록 버트레스의 배치 및 텐던의 배치를 주의할 기울여야 한다고 사료된다.

5.3 고정단 프리스트레스 힘의 이론값과 측정값의 비교 분석

텐던의 고정단에 도입된 긴장력의 측정값과 이론값을 비교하여 Table 5와 Fig. 5에 각각 나타내었다. 고정단에서의 프리스트레스 힘의 이론값에 대한 측정값의 비는 96-105%를 나타낸다. 측정결과와 계산결과는 거의 일치하고 있으며, 두 값의 비의 최대 편차는 5% 정도까지 발생하는 것으로 나타난다.

텐던 TC5의 고정단의 프리스트레스 힘은 10.23tonf 및 10.62tonf을 나타내며, 텐던 TC9의 고정단에서의 프리스트레스 힘은 9.60tonf을 나타낸다. 이러한 측정 결과는 두 텐던의 긴장단에서 동일한 설계 긴장력을 도입할지라도, 각 텐던의 고정단에서의 프리스트레스 힘은 약 8%의 차이를 나타내는 것을 의미한다. 이는 두 텐던의 서로 다른 텐던 배치 형상 및 길이에 의한 마찰 손실값의 차이에서 기인한다.

Table 5 고정단에서의 프리스트레스 힘

텐던 구분	측정값 (tonf)	이론값 (tonf)	측정값/이론값 (%)
TC5-A	10.23	10.64	96.2
TC5-B	10.62	10.64	99.8
TC9	9.60	9.13	105.1
BE3	9.56	9.91	96.5
BE6	9.69	9.84	98.5

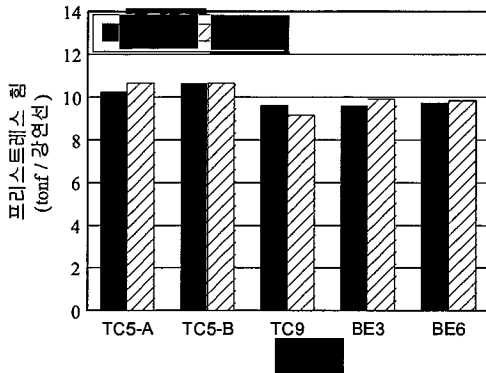


Fig. 5 고정단에서의 프리스트레스 힘

또한, 텐던 BE6의 긴장단의 프리스트레스 힘은 11.55tonf을 나타내며, 고정단의 프리스트레스 힘은 9.69tonf으로서, 긴장단과 고정단의 프리스트레스 힘의 차이는 16%를 나타내고 있다. 긴장 작업은 양단 긴장이 아니라 1단 긴장이므로, 이러한 두 정착단의 프리스트레스 힘의 차이는 마찰손실로부터 기인한다.

텐던 TC5의 고정단에 설치한 두개의 변형률 게이지의 측정값은 차이를 나타내고 있다. 텐던 TC5의 고정단에 설치한 두개의 변형률 게이지의 측정값은 각각 10.23tonf 및 10.62tonf으로서 두 값은 서로 4% 정도의 편차를 나타낸다. 본 연구결과로부터 여러가닥의 강연선으로 구성되는 텐던의 경우, 각 강연선에 도입되는 프리스트레스의 힘은 다소의 편차를 가질 수 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 PSC 박스 거더 교량의 프리스트레스의 초기 손실을 추정하기 위한 새로운 변형률 게이지 시스템을 제안하였다. 제안된 변형률 게이지 시스

템을 실제로 가설되고 있는 PSC 박스 거더 교량에 적용하여 프리스트레스의 손실, 특히 췌기의 미끌어짐에 의한 손실 추정에 관한 연구를 수행하였으며, 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 현장 조건에서의 프리스트레스 힘 측정을 위한 새로운 측정 시스템으로써 나선형 변형률 게이지를 제안하였다. 제안된 시스템은 긴장도중의 프리스트레스 힘과 유압과의 관계를 선형적으로 나타내며, 서로 다른 텐던에서 측정된 프리스트레스 힘의 비와 이론값은 거의 일치하고 있다. 따라서, 본 연구에서 제안한 새로운 측정시스템은 텐던에 도입되는 프리스트레스 힘을 효율적으로 추정할 수 있다고 사료된다.
- 2) 췌기의 미끌어짐에 의한 프리스트레스 손실에 후의 신상단에서의 프리스트레스 힘의 이론값에 대한 측정값의 비는 93~111%이며, 비의 편차는 10%를 초과하는 경우도 나타난다. 설계기준의 마찰계수를 사용하여 산정한 고정단 프리스트레스 힘의 이론값에 대한 실제 측정값의 비는 96~105%이며, 비의 편차는 5%정도이다. 따라서, 구조물 설계시 프리스트레스의 손실을 산정할 때, 마찰손실의 산정보다 췌기의 미끌어짐에 의한 손실 산정이 더욱 큰 불확실성을 내포할 수 있다고 사료된다.
- 3) 텐던의 정착시, 췌기의 미끌어짐으로 인한 프리스트레스 힘의 손실률은 텐던마다 차이를 나타내며, 이에 따라 긴장단에서 극부적으로 프리스트레스가 크게 변동할 수 있다고 사료된다.
- 4) 동일한 텐던 내에서의 각기 다른 강연선에서 측정된 프리스트레스 힘은 약간의 편차를 나타내고 있다. 텐던의 정착후 긴장단에서는 9%의 편차를 나타내며, 고정단에서는 4%의 편차를 나타내었다.
- 5) 박스 거더의 연속 텐던의 프리스트레스 손실률은 각 텐던마다 다양한 값을 나타낸다. 이는 각 텐던의 상이한 텐던 배치 형상 및 텐던 길이의 차이에서 기인하는 것으로 사료된다. 따라서 PSC 박스 거더의 설계시, 프리스트레스의 손실을 최소화할 수 있도록 버트레스의 배치 및 텐던의 배치에 주의를 기울여야 한다고 사료된다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, 도로교 표준시방서, 1996.
2. 유성근, 이재혁, 김중화, "외부추기강선을 이용한 원호 대교의 성능개선 공사," 콘크리트학회지, Vol. 7, No. 6, pp.30-37.
3. 문제길, 이재형, "PS 콘크리트 구조물에서 마찰손실을 고려한 긴장력 결정에 관한 연구," 대한토목학회논문집, 제17권, 제 I-1호, 1997, pp.89-99.
4. 정배근, 한경봉, 박선규, "PS 긴장계의 마찰손실량에 관한 실험적 연구," 대한토목학회논문집, 제20권, 제 5-A호, 2000, pp.797-804.
5. Shenoy, C. and Frantz, C., "Structural Tests of 27-Year-Old Prestressed Concrete Bridge Beams," PCI Journal, Vol. 36, No. 5, 1991, pp.80-90.
6. Pessiki, S., Kaczinski, M. and Wescott, H. H., "Evaluation of Effective Prestress Force in 28-Year-Old Prestressed Concrete Bridge Beams," PCI Journal, Vol. 41, No. 6, 1996, pp.78-89.
7. Naaman, A. E. and Hamza, A. M., "Prestress Losses in Partially Prestressed High Strength Concrete Beams," PCI Journal, Vol. 38, No. 3, 1993, pp.98-113.
8. Burns, N. H., Helwig, T. and Tsujimoto, T., "Effective Prestress Force in Continuous Post-Tensioned Beams with Unbended Tendons," ACI Structural Journal, Vol. 88, No. 1, 1991, pp.84-90.
9. Sharif, A., Taher, S. E. F. and Basu, P. K., "Time-Dependent Losses in Prestressed Continuous Composite Beams," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 11, 1993, pp.3151-3168.
10. Tassi, G. and Rozsa, P., "Forces in Prestressed Concrete Bridges Constructed by Free Cantilevering," Periodica Polytechnica Ser. Civil Eng., Vol. 36, No. 3, 1992, pp.355-361.
11. Wollmann, C. L., Arrellaga, J. A., Breen, J. E. and Kreger, M. E., "Field Measurement of Prestress Losses in External Tendons," ACI Structural Journal, Vol. 93, No. 5, 1996, pp.595-601.
12. Saidi, M. S., Shields, J., O'Connor, D. and Hutchens, E., "Variation of Prestress Force in a Prestressed Concrete Bridge During the First 30 Months," PCI Journal, Vol. 41, No. 5, 1996, pp.66-72.
13. Arrellaga, J. A., Instrumentation Systems for Post-Tensioned Segmental Box Girder Bridges, Master's Thesis, University of Texas at Austin, 1991.
14. Collins, M. P. and Mitchell, D., Prestressed Concrete Structures, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
15. Choquet, P., "Validation of a Spiral Strain Gauge to Monitor Load and Strains in 7-Wire Steel Strains Used in Prestressed and Post-Tensioned Concrete," Quebec, Canada, 1993.
16. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Standard Specifications for Highway Bridges, 16th ed., Washington D. C., 1996.

(접수일자 : 2000년 8월 29일)