

서울시립대학교 도시과학연구원
도시과학논총 제29권 2003년 12월
The Journal of Urban Sciences
The University of Seoul
Vol. 29, No.1, December 2003

8 경간 연속 PSC 보의 현장계측 분석

장 석 윤* · 천 경 식* · 박 상 보** · 임 성 순*

(*서울시립대학교 토목공학과, **서울시 건설안전관리본부)

Field Measurement Analysis of 8-Span Continuous Prestressed Concrete Bridges

Chang, Suk Yoon · Chun, Kyoung Sik · Park, Sang Bo · Yhim, Sung Soon

ABSTRACT

In this paper, measurement data of 8-span continuous PSC girder bridges are presented. The girders on 8-span continuous PSC girder bridges are arranged total four tendons. Among four tendons, the first and second tendon to endure self-weight of PSC beam and working loads is arranged in manufacturing procedure of PSC beam. The third and fourth tendon copes with additional dead load such as concrete slab, asphalt and with live load. The measurement data for each construction stage show displacements at end zone of girder, thermal difference between upper and lower of girder, and loss amount caused by slip of anchorage set and friction. The data show that thermal variation has not influence on measurement data and slip and friction losses on measuring data are lower than loss on design. Loss amount of prestress determining efficiency of PSC beam is similar to data based on specification. In the future, long term losses caused by creep and shrinkage of concrete can be measured more accurate referring to measuring data of this paper.

Key Words : 8-Span Continuous, PSC Bridges, Prestress Losses, Field Measurement

1. 서 론

PSC보가 국내에 도입된지는 거의 40년 가까이 되었고, 시공의 간편성, 공사기간의 단축, 경제성 등의 이유로 현재 국내에서 설계, 시공되는 교량형식 중에 높은 비중을 차지하고 있다. 단기간에 알맞는 구조형식이라는 구조적 제약으로 인하여 최대적용지간이 30~40 m 이내로 제한되고, 신축이음부 증가로 인한 사용성 및 내구성 저하, 지진 하중 작용시에 낙교방지용 시설이 필요한 등의 많은 문제점을 갖고 있다⁽¹⁾. 따라서 이러한 문제점들에 대처하기 위해 현재 국내에서는 상부슬래브만을 지점에서 연속화하는 방법이 설계 및 시공에 사용되고 있다. 하지만 간이적인 연속화 방법 또한 단점을 가지고 있다. 즉, 활하중에 의해 최대 부모멘트가 발생하는 단면이 RC구조로 되어 상부 슬래브에서 휨균열이 발생되고, 거더의 단면형상 및 강선의 배치가 단경간교를 기준으로 설계되기에 연속교로서의 구조적 효율성이 결여되어 경제성이 저하된다⁽²⁾. 적용지간에 있어서도 단경간교와 동일한 제약을 받고 지간이 길어질 경우 거더 높이가 높아질 뿐 아니라, 거더단면에만 필요 프리스트

레싱을 도입하게 되므로 최대도입 가능한 프리스트레스량이 제한되는 등 사하중에 대해서는 비효율적인 구조적 거동을 나타낸다.

본 연구는 상부 슬래브의 연속화 뿐만 아니라 거더를 연속화하여 거더의 단면 높이를 줄이고, PSC보와 상부 슬래브 전체를 하나의 구조계로 연결하는 8경간 연속 공법의 시공중 계측치를 비교, 분석하여 PSC 연속보의 구조적 효율성을 연구하고자 한다.

2. PSC 연속화

PSC보 거더의 연속화 공법은 상부 슬래브만을 지점에서 연속화하는 기존방식과는 달리 상부 슬래브와 함께 거더 자체를 구조적으로 연결하여 PSC보 거더 및 합성형 단면의 바닥판 콘크리트에도 압축력을 도입할 수 있는 새로운 공법이다^{(3),(4)}. 즉, 합성형 단면인 바닥판 콘크리트에도 압축력을 도입하여 균열을 제어하는 등 기존 PSC 단순교의 단점을 획기적으로 개선한 공법으로, 국내에서는 서울교 확장공사^{(3),(4)}에 처음으로 8경간 연속화 공법을 적용하였다.

표 1. 시공단계별 구조적 특징

구분	구조적 특징
1단계 - 비합성 단경간 구조계	보 자중과 보 거치 후 타설되는 경간내 가로보와 이를 위한 작업하중 지지
2단계 - 비합성 연속 구조계	단경간 PSC보를 비합성 연속 구조계로 전환, 현장 탄설 콘크리트 바닥판과 이에 따른 작업하중지지
3단계 - 합성 연속 구조계	현장 탄설 콘크리트 바닥판에 선행압축력을 도입하여 포장과 연석등의 2차 사하중과 활하중에 의한 중간 지점부의 부모멘트를 효율적으로 지지



사진 1. 8경간 PSC보

PSC보 연속화 공법은 거더높이 최소화로 기존교량 높이와 일치시키면서 최대홍수위를 확보할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 교량의 최대 문제점인 신축이음 불필요로 공사비 절감 및 차량 주행시 안정감과 쾌적성을 대폭 향상시킬 수 있다. PSC보 8경간 연속화 공법의 프리스트레스력 도입을 위한 PS 강연선 긴장작업은 비합성 단경간 구조계, 비합성 연속 구조계, 합성 연속 구조계의 3단계로 구분 할 수 있으며 강선의 시공 단계별 구조적 특징은 표 1과 같다.

3. 계측 시스템

시공 중 계측에서 연속강선의 긴장력 도입에 따라 교량에서 발생하는 응력과 변형을 계측하기 위하여 설치된 게이지와 계측항목은 표 2와 같다. 모든 단계의 시공 중 계측에서 LVDT(변위량 게이지)는 강선의 긴장이 도입되는 보에 따라 이동하여 설치 및 계측을 수행하였다. 균열 게이지는 강선 긴장에 따른 격벽의 균열 위치를 미리 예측할 수 없으므로 긴장 전에 설치가 불가능하다. 그러므로 균열 게이지는 긴장 단계별로 격벽의 균열 발생 여부를 관찰하고 균열 발생시 균열부에 설치하여 균열의 진전

여부를 측정하도록 하였다. 온도게이지는 같은 위치에 보의 상하부를 측정하도록 하여 강선의 긴장 작업동안 온도에 의한 보의 변형을 측정할 수 있도록 하였다.

표 2. 설치된 게이지 종류 및 계측항목

종류	계측항목
Foli Type Strain Gauge	계측부위의 응력측정
Vibration Wire Type Gauge	계측부위의 변위측정
LVDT	긴장작업시 보의 변위량 측정
Temp.	보 상, 하부 온도차에 의한 응력변화 측정
Load Cell	마찰 및 정착장치에 의한 긴장력 손실측정

시공을 위해서 로드셀(load cell)은 정착구 안쪽에 설치하고 강선에 썬기를 설치하지 않았다. 썬기대신 긴장용 잭으로 강선을 고정시켰으며 계측이 끝나고 로드셀을 수거한 후 썬기를 설치하고 강선 긴장을 하였다. 로드셀을 정착구 안쪽에 설치하여 강선의 긴장력과 정착단의 손실량을 계측하였다.

4. 계측결과 및 분석

본 절에서는 앞서 제시한 PSC 연속화 공법과 계측시스템을 토대로 시공단계를 갖는 8경간 연속 PSC보의 손실을 알아보기 위해 수행한 현장계측실험 결과를 분석하여 제시함으로써 향후 이 분야를 연구하는데 필요한 기초자료를 제공하고자 한다. 계측을 위해 선정된 대상모델은 시공중인 서울교 8경

간 연속 PSC보^{(3),(4)}이다. 변위계, 변형률계, 하중계, 온도계 등을 설치하고 긴장작업에 따른 거동이력과 온도변화 등을 계측하였다. 본 실험에 앞서 대상 교량의 설계도면과 구조계산서를 면밀히 검토하고 기본적인 구조 해석을 통하여 구조물의 주요거동을 파악할 수 있는 위치를 산정하였다^{(5),(6),(7)}.

4.1 변위

LVDT(변위계)의 측정위치는 그림 1과 같다. 단계 1에서는 강선긴장 작업 순서를 결정하기 위하여 강선 긴장에 따른 보 양단의 종방향 변위량을 30% 긴장시에 대하여 계측하였다.

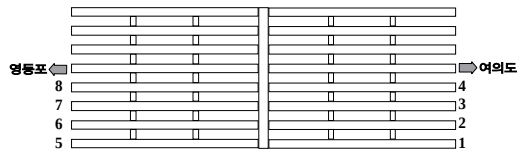


그림 1. LVDT의 측정위치

30% 강선긴장 작업시 보의 과도한 변위가 발생하지 않았으며, 보의 상대적인 변위에 의한 격벽에 균열도 발생하지 않았다. 강선 긴장에 따른 변위량 계측값을 정리하면 표 3과 같다. 우선, 다음과 같이 합성전 후 보 양단의 변위량을 산정할 수 있다.

합성전 :

$$\delta = \frac{170.57 \times 10^3 \times 30 \times 10^2}{280000 \times 6226.5} = 2.94 \text{ mm}$$

합성후 :

$$\delta = \frac{170.57 \times 10^3 \times 30 \times 10^2}{280000 \times 10627.75} = 1.72 \text{ mm}$$

표 3. 각 단계별 강선긴장시 보 양단의 변위량 (mm)

단계	변위량	1경간 변위량	비고
1	0.67	0.67	비합성
2	0.66	0.66	비합성
3	1.30	0.65	합성
4	1.35	0.68	비합성
5	1.15	0.58	합성

표 3에서 결과값들을 비교해 보면 계측치가 산정값에 비하여 합성전의 경우 23%, 합성후는 35%정도만을 나타내고 있다. 이러한 오차는 다음과 같이 요소에 의한 것으로 판단된다.

우선, 철근의 면적을 콘크리트의 면적으로 환산하여 계산시 압축, 인장철근을 고려하지만, 실제 그 이외에 전단철근 등 기타 보강철근이 배근되므로 이로 인한 차이로 판단된다. 그 다음으로는 강선의 긴장력 손실이다. 설계시 도입되는 긴장력은 손실량을 고려하여 산정하게 된다. 이러한 손실에는 마찰손실과 정착구 부분의 Anchorage Slip Loss 등이 있다. 설계시 마찰손실량^{(8),(9)}은 목표한 170.57ton에 대하여 강선이 한 경간을 지나갈 경우 40ton정도로 산정하고 있으며, 정착구 부분의 Anchorage Slip Loss는 30ton정도의 손실을 산정하고 있다. 그러므로 강선의 긴장력은 위에 계산한 값보다 24%정도 적은 값을 나타내며 이러한 결과로 실제 계측한 변위량도 적어진 것으로 판단된다. 마지막으로, 콘크리트 강도나 격벽에 의한 구속, 그리고 지점부의 마찰에 의한 저항 등의 영향을 들 수 있다.

4.2 온도

각 시공단계별 연속화 시공은 시작부터 작업이 완료되기까지 상부표면에 햇빛에 의한 보의 상, 하부에 온도 변화가 발생하며, 이러한 온도의 영향으로 PSC보에는 굽힘 모멘트가 발생하게 된다. 시공 과정동안 2시간 간격으로 온도를 계측하였다. 시공 중 계측은 강선에 긴장력이 도입되기 전의 상태를 초기치로 설정하여 긴장에 따른 상하부의 응력변화량을 검토하고, 초기의 보의 상하부 온도차를 기준으로 시간에 따른 온도차의 변화량을 가지고 굽힘 모멘트를 산정하였다. 이 때 콘크리트의 열팽창계수 α 는 1.2×10^{-5} 이다.

표 4는 초기의 상하부 온도차를 기준으로 시간에 따른 온도차의 변화량과 응력을 산정하여 나타낸 것이다. 산정한 중앙경간의 발생응력은 긴장력 도입에 의한 중앙부의 발생응력보다 매우 작은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 값은 계측에 의한 오차범위 내에 있으므로 상하부 온도차에 의한 영향은 시공 계측값에 큰 영향을 주지 않는다고 판단된다.

4.3 하중계

8경간 4번 강선 긴장력을 측정하고자 강선 정착구에 하중계를 영구 설치하였다. 하중계 설치하는 사진 2와 같다.



사진 2. 하중계 설치

하중계를 이용하여 강선 긴장 작업시 도입된 하중과 Anchorage Slip Loss의 양을 측정하고자 긴장도입 작업완료시와 긴장작업 종료후 1시간후에 측정하였으며, 하루를 간격으로 2일간 측정하였다. 강선 긴장시 목표한 긴장력은 170.57ton이다. 표 5는 계측된 손실량과 설계시 산정한 손실량을 비교하여 나타낸 것이다. 계측된 결과 강선 긴장후 Anchorage Slip Loss는 7.89%와 11.30%이며, 이는 설계시 산정한 Anchorage Slip Loss에 의한 손실을 17.38%보다 작은 값을 나타내고 있다. 그러므로 도입된 강선의 긴장력은 설계시 산정한 값보다 양호한 것으로 사료된다.

4.4 변형률 및 응력

연속화 강선 긴장에 따른 보의 응력 및 변형률⁽¹⁰⁾을 측정하여 그 결과를 분석하고자

표 4. 상하부 온도차 변화량에 따른 발생응력

구분	시간		
	10시 ~ 12시	12시 ~ 2시	10시 ~ 2시
시간에 따른 상하부 온도차	0.9	- 1.1	- 0.2
굽힘모멘트($kg \cdot cm$)	- 4.09E5	5.00E5	9.09E4
중앙경간 상부의 발생응력	1.62	- 1.98	- 0.36
중앙경간 하부의 발생응력	- 1.62	1.98	0.36

한다. 강선긴장시 긴장력에 직접 작용되는 하중이 지배적인 보의 경우 중앙경간은 부 모멘트가 발생하고 시공이음부는 정모멘트가 발생하게 된다. 그러므로 게이지가 설치된 위치에서는 모두 압축응력을 받게 되지만, 연속화로 인한 2차 모멘트의 하중을 지배적으로 받는 보의 경우는 게이지 설치위치에서 인장응력이 발생한다. 이러한 2차 모멘트에 의한 인장응력 발생은 강선긴장의 효과를 감소시킨다.

게이지의 설치위치는 지점부의 상부철근에 설치되므로 피복두께 5cm를 고려하여 계산되었다. 거더 중앙경간은 V/W Type Strain Gauge의 경우 하부철근의 하부에 설치되어 지점부와 마찬가지로 피복두께 5cm만을 고려하였으나, Foil Type Strain Gauge는 하부철근의 상부에 위치하므로 피복두께 5cm와 철근의 지름(2.5cm)을 고려하여 계산되었다.

표 6. 시공단계 1에서의 긴장시 변형률 및 응력

위치	응력(kg/cm ²)		변형률 (10 ⁻⁶)
	계측치	해석치	
P4-1	28.98	36.23	103.5
P4-2	31.14		111.2
P4-3	26.96		96.3
P4	31.72		-

표 7. 시공단계 2에서의 긴장시 변형률 및 응력

위치	응력(kg/cm ²)		변형률
	계측치	해석치	
Span 4	-3.08	-7.85	-11.00
Span 5	-4.58	-8.02	-16.36
Span 6	35.72	42.80	127.57
P4	-0.39	1.76	-1.40
P5	44.68	38.34	159.57

단계 1에서 보의 중앙경간은 강선의 긴장 도입에 의한 부모멘트와 압축력에 의해 하부에 압축응력이 발생한다. 표 6는 거더 중앙경간 하부와 연속화 지점부 상부에서의 응력을 비교하여 나타낸 것이다. 연속화된 지점부는 강선의 긴장에 의해 정모멘트와 압축력을 받으며 상부에는 압축응력이 작용하게 된다. 발생하는 오차는 강선 긴장력의 산정 및 단면 산정에서의 오차에 의해 발생된다고 사료된다.

표 5. 계측된 손실량과 설계시 산정한 손실량 비교

구분	도입 긴장력 (ton), A	손실후 긴장력 (ton), B	손실량 (ton), A - B	손실률 (A - B)/A
교대 1	175.00	161.20	13.80	7.89%
교대 2	172.60	153.10	19.50	11.30%
설계시 산정값	170.57	140.92	29.65	17.38%

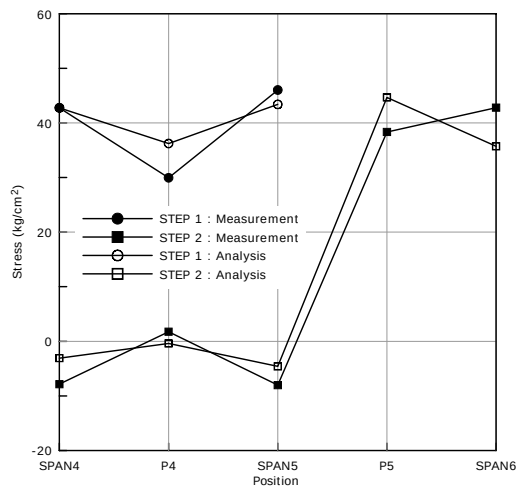


그림 2. 시공단계 1과 2에서의 계측시와
구조해석치에 의한 응력비교

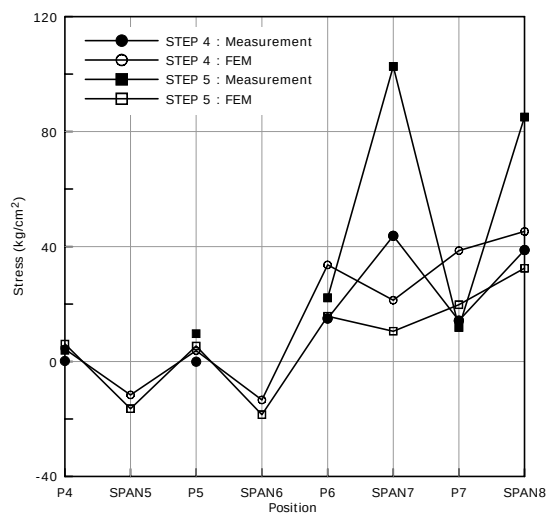


그림 3. 시공단계 4와 5에서의 계측시와
구조해석치에 의한 응력비교

표 7은 3번강선 긴장을 하는 4경간 연속화(단계 2)에서의 측정된 변형률에 의한 응력을 나타낸 것이다. P5와 SPAN6은 강선 긴장에 따른 직접적인 영향을 받으며 SPAN4와 SPAN5는 강선 긴장에 따른 2차 모멘트의 영향을 받는다. 그림 2는 단계 1과 2에서 구조해석치^{(3),(4)}와 계측한 응력을 비교하여 나타낸 것으로 서로 유사한 분포를 나타내고 있다. 약간의 거동차이는 구조해석시

가정한 강선 긴장력과 실제 긴장력의 차이 및 기타 조건의 차이로 인해 발생된다고 판단된다. 추가적으로 3번강선 긴장을 포함한 8경간 연속화(단계 4)와 4번강선 긴장을 포함한 8경간 연속화(단계 5)에서의 측정된 응력과 구조해석치에 의한 응력을 그림 3에 비교하여 나타내었다. 전반적으로 유사한 분포경향을 나타내고 있음을 볼 수 있다.

5. 결론

8경간 연속 PSC 교량의 가설 순서는 크게 5단계로 나누어지고, 각 단계별 시공순서는 보의 합성을 위한 시공 이음부 콘크리트 타설, 연속강선의 긴장작업, 현장타설 바닥판 콘크리트 타설로 구분된다. 각 단계별 긴장 연속화 시공중 계측은 빔 끝단에 변위량을 계측하였고, 온도게이지를 상부와 하부에 설치하여 온도에 의한 영향을 분석하였으며, 정착구에 로드셀을 설치하여 Anchorage Slip Loss에 의한 손실량과 도입된 긴장력 손실량 및 마찰손실을 계측하였다.

계측결과 분석을 통해 온도에 의한 영향은 시공중 큰 영향을 주지 않았으며, 정착구 손실 및 마찰손실량은 설계시 산정한 손실량보다 적은 값을 나타내어 PSC보의 구조적 효율성을 지배하는 요소인 프리스트레스의 손실에 대하여는 시방서 규정에 의한 계산결과와 유사하여 당초 목표한 긴장력이 도입되고 있어 향후 PSC 연속보의 설계 및 시공의 발전가능성을 확인하였다. 향후 본 연구에서 분석한 자료를 바탕으로 장기간에 의해 발생하는 콘크리트의 크리프, 건조수축 등에 의한 영향을 보다 더 정확히 측정할 수 있을 것이며, 현장에서 PSC 교량의

시공성 향상과 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 신현목 (2000), 프리스트레스 콘크리트, 동명사, 제6판.
2. 오병환, 채성태, 정착형 (2001), 텐던 커플러에 의해 연속화된 프리스트레스 콘크리트 교량 부재의 응력평가, 대한토목학회논문집, 제21권, 제2호, pp. 189-196.
3. 서울특별시 (1999), 서울교 및 남단지하차도 확장공사 실시설계 - 구조 및 수리계산서.
4. 현대건설주식회사 기술연구소 (2001), 서울교 확장교량 시공중 계측보고서.
5. 건설교통부 (2000), 도로교설계기준, 한국도로교통협회.
6. 박선규 (1998), 프리스트레스 콘크리트 구조물의 해석 및 설계, 한국전산구조공학회.
7. 채원규 (1998), 연속 프리스트레스 콘크리트의 빔교의 내하력 평가 기법에 관한 연구, 한국산업안전학회지, 제13권, 제3호, pp. 126-135.
8. 문제길, 이재형 (1997), PS 콘크리트 구조물에서 마찰손실을 고려한 긴장력 결정에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 제17권, 제1호, pp. 89-99.
9. 정배근, 한경봉, 박선규 (2000), PS 긴장재의 마찰손실량에 관한 실험적 연구, 대한토목학회논문집, 제20권, 제5호, pp.797-804.
10. 이존자, 김민주, 이용학 (2002), 프리스트레스 콘크리트 휨 부재의 단면응력과 변형률에 대한 확률론적 특성값 결정, 대한토목학회논문집, 제22권, 제3호, pp.479-488.
11. Arthur H. Nilson (1987), "Design of Prestressed Concrete", John Wiley & Sons, Inc., 2nd Ed.
12. Bradford M.A. (1997), Shrinkage behavior of steel-concrete composite beams, ACI Structural Journal, Vol.94, No.6, pp. 625-632.
13. Collins M.P. and Mitchell D., "Prestressed concrete structures", Prentice-Hall, Inc., 1991.
14. Naaman A.E. (1982), "Prestressed Concrete Analysis and Design", McGraw Hill, New York.
15. Oehlers D.J. and Bradford M.A., "Composite Steel and Concrete Structural Members, Fundamental Behavior", Pentagon.
16. Onyemelukwe O. and Kunnath S. (1997), Field measurement and evaluation of time-dependent losses in prestressed concrete bridges, University of Central Florida.
17. Ansourian P., Experiments on continuous composite beams, Proc. Instn Civ Engrs Part 2, 71, Dec 25-51.
18. Johnson R.P., "Composite Structures of Steel and Concrete", 2nd Ed.
19. LUSAS Manual (2002), Ver 13.4, FEA Ltd.