

PSC 박스거더교의 온도하중에 대한 거동 연구

Behavior of PSC BOX Girder Bridges under Temperature Load

강 상 규* 이 형 준**
Kang, Sang Gyu Lee, Hyung Joon

ABSTRACT

Transverse stress and longitudinal crack which are induced by temperature difference in box-girder sections and slab of which box-girder is composed have an important effect on endurance and economical efficiency of bridges. The study on longitudinal behavior of bridges which are subject to thermal load is reflected on the design of bridges. But, the study on transverse behavior of bridges has been performed just recently in foreign countries for finding the cause of longitudinal crack and in Korea, has not been tried in spite of large temperature variance due to geographical condition.

This study examines temperature distribution feature in box-girder sections and bridge behavior due to thermal load, with measuring temperature distribution and stress of PSC box-girder bridge which is being constructed actually, and investigates appropriateness of design thermal load of highway bridge design code.

1. 서 론

PSC 박스거더교량의 경우 온도하중에 의해 복부나 슬래브에 유해한 균열이 많이 발생하고 있으며, 특히 박스거더 단면내의 온도차 및 박스거더를 구성하는 슬래브 내에서의 온도차에 의해 유발되는 횡방향 응력 및 이에 의한 균열발생은 구조물의 내구성과 경제성에 큰 영향을 미치고 있다. PSC 박스거더교의 설계온도하중으로 사용하고 있는 단면내 온도분포는 외부의 온도에 따라 많은 영향을 받으며, 특히 지형 및 기후에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 외국에서는 각 나라마다 지역 및 기후에 맞도록 연구결과를 바탕으로 설계규정을 정하여 사용하고 있는 실정이나, 국내에서는 지리적 여건상 온도변화가 심함에도 불구하고 이에 대한 연구가 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 국내에서 실제 시공되고 있는 PSC 박스거더교량에서의 단면내 온도분포 및 온도하중에 의한 응력을 측정하여 단면내의 온도분포 특성과 이에 의한 거동 특성을 규명하고자 하며, 또한, 측정결과와 도로교표준시방서에 규정된 설계온도하중을 비교 검토하여 현 설계규정의 타당성을 분석하고자 한다.

2. 온도하중에 의한 교량의 거동

* 정회원, 한국도로공사 도로연구소 콘크리트구조연구실 연구원

** 정회원, 대전산업대학교 토목공학과 교수

2.1 온도하중의 개념

콘크리트 교량은 전 표면에 걸쳐 온도변화의 3가지 주요 메커니즘에 의해 지배된다. 그림 1은 교량의 온도변화를 유발하는 열의 복사(Radiation), 전도(Conduction), 대류(Convection)의 3가지 요소를 도시한 것으로, 이중 태양열의 복사에 의해 생기는 온도변화는 복잡한 과정이며 가장 중요한 요소로서 그 양은 계절, 시간대, 주변 조건, 구조물의 위치 등에 따라 달라진다. 구조물의 표면에 입사하는 태양 복사의 양은 구조물 표면의 태양에 대한 경사각에 따라 변한다. 특히, 구조물 방향 효과는 박스거더 단면에서 캔틸레버 부분에 의한 복부부분의 그들의 정도를 결정할 때 가장 중요하다. 열의 전도 및 대류는 작고 산정하기 어려우며 풍속, 주변기온, 표면온도, 표면 상태, 기하학적 모양 등에 따라 달라진다.

2.2 콘크리트 교량에서의 온도분포 및 응력분포

콘크리트 교량의 온도분포는 앞서 열거한 요인에 의해 시간에 따라 교량표면에 시간의존적 경계조건을 만든다. 박스거더교의 단면 깊이에 따른 온도경사는 높은 태양복사에너지, 주위 대기온도 상승, 최소 풍속의 조건을 만족하는 여름동안에 최대로 발생하는데, 이러한 온도경사의 크기는 교량의 외형과 단면의 깊이에 의존하는 것으로 알려져 있다. 단면내의 온도분포(경사)에 의해 콘크리트 부재에는 횡방향 휨모멘트가 발생되며 이 모멘트는 매우 큰 인장응력을 발생시킬 수 있다.

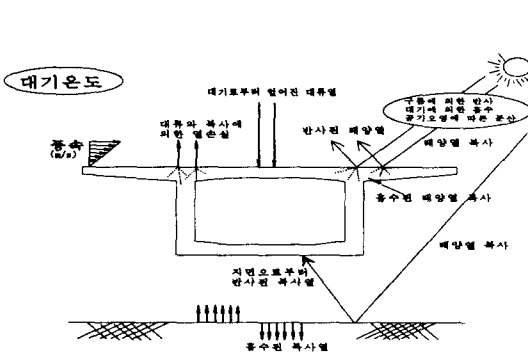


그림 1 교량의 온도변화 요소

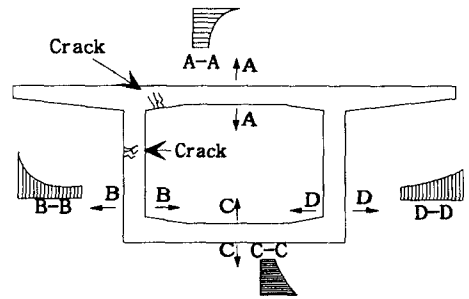


그림 2 온도변화에 대한 온도응력 발생

그림 2는 박스거더의 각 단면에 발생하는 온도분포 및 이로 인해 발생이 가능한 균열을 나타낸 것으로 단지 온도하중으로 인하여 종방향 균열이 발생할 수 있음을 보여주고 있다. 박스거더교량에서 각 부재의 두께에 따라 발생하는 온도차이가 횡방향의 수직 및 휨응력을 일으킬 수 있으며, Priestly는 횡방향응력이 종방향에서 발생하는 응력과 같을 수 있음을 지적하고 있다.

2.3 온도하중에 대한 설계규정

PSC 박스거더교의 단면내 온도분포는 지형조건과 기후조건에 따라 각각 다른 특성을 갖기 때문에 외국에서는 많은 실험적 연구를 수행하여 이를 토대로 그 나라의 지형과 기후조건에 맞는 설계온도하중을 그림 3과 같이 각각 규정하고 있다. 뉴질랜드에서는 그림 3(b)와 같이 상부슬래브와 복부이하에서는 단순한 등분포 온도분포를 갖고 그 차이를 17℃로 하여 이를 박스거더교량의 설계하중으로 규정하였다. 이후에 Priestley의 연구결과를 토대로 그림 3(c)와 같은 온도분포를 PSC 박스거더교량의 설계온도하중으로 채택하였다. 영국의 경우 1978년 전까지는 그림 3(d)와 같이 최대온도차이가 8.3℃이

고 단면의 상부와 하부사이에 선형의 온도분포를 설계온도하중으로 적용하였으나, Emerson이 7개의 교량에 대해 12년 동안 실측한 온도분포를 토대로 상부슬래브와 복부의 온도차이를 13.5°C인 그림 3(f)와 같은 비선형분포를 콘크리트구조물 설계규정(BS5400)으로 적용하고 있다. 독일에서는 그림 3(g)와 같이 교량의 상부 표면 온도 5°C에서 하부로 선형적인 감소를 하는 온도분포를 DIN1072에서 규정하고 있다. AASHTO의 교량하중에 대한 위원회에서는 1981년에 그림 3(h)와 같이 교량설계시 사용할 수 있는 세 개의 직선부분으로 구성된 온도분포를 제안하였다.

국내의 경우 도로교표준시방서에서는 그림 4와 같이 바닥판과 거더부분의 온도차에 의해 발생하는 단면력을 산출하는 경우 5°C를 표준으로 하고, 온도분포는 바닥판과 거더부분에 있어서 균일한 것으로 규정하고 있으나 이에 대한 구체적인 근거를 갖고 있지 않은 상태이다.

3. 온도분포 측정결과

3.1 측정내용

본 연구에서는 국내의 지형조건과 기후조건에서 발생할 수 있는 PSC 박스거더교의 단면내 온도분포 및 이에 따른 거동특성을 규명하기 위하여 시공되고 있는 교량에 대하여 현장계측을 실시하였다. PSC 박스거더교의 단면내 온도분포 및 이에 따른 온도응력 측정은 교량의 시공단계에 따라 개단면 및 폐단면에 대해서 계절에 따라 실시하였다.

측정 대상인 횡성대교(그림 5)는 영동고속도로 원주~강릉간 확장공사 구간내 강원도 횡성군 우천면에 위치하여 협준한 계곡부를 통과하는 교량으로서 상행선은 1실 PSC 박스거더교로 된 2차로 교량이고, 하행선은 1실 PSC 박스거더로 된 3차로 교량이다. 계측은 3차로 교량인 하행선 교량에 대하여 실시하였다.

단면은 주두부에서의 총 높이가 600cm이고 중앙부에서의 높이가 250cm인 변단면으로 되어있고, 상부슬래브의 두께는 270cm로 전 지간에 걸쳐 일정하다. 또한, 하부 슬래브의 두께는 주두부에서 60cm, 중앙부에서 25cm인 변단면으로 되어 있고, 복부의 두께는 50cm로 전 지간에 걸쳐 일정하게 되어 있다.

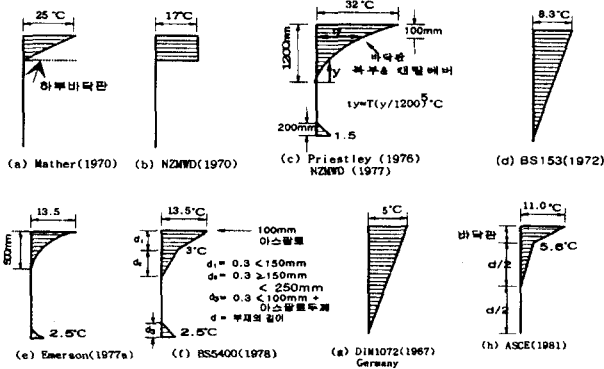


그림 3 각 시방서의 온도분포 규정

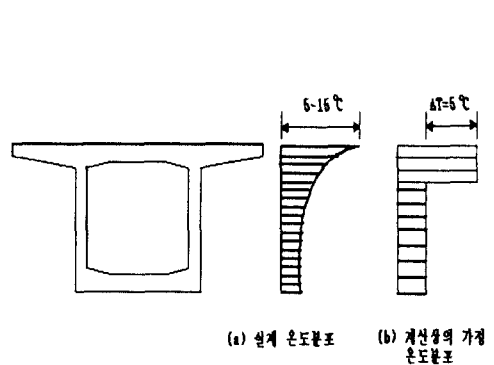


그림 4 도로교표준시방서의 온도분포 규정

박스거더의 각 단면의 깊이에 따른 온도분포 특성을 규명하기 위하여 계측센서는 그림 5에서 나타난 것과 같이 주두부(A-A단면), 전단부(B-B단면), 지간의 1/4 지점(C-C단면), 중앙단면(D-D단면) 등 지간내의 4개 단면에 각각 온도측정센서(Thermocouple, 42~46PT), 진동형 변형률측정센서(V.W Gage 10EA, 콘크리트 매립게이지 14EA(종방향 10EA, 횡방향 4EA))를 설치하였다. 또한, 각 단면에

서의 단면 내·외부 온도분포 및 변형률분포를 측정하기 위해 설치한 각종 센서들은 각 단면내에 일정한 간격으로 설치하였다.

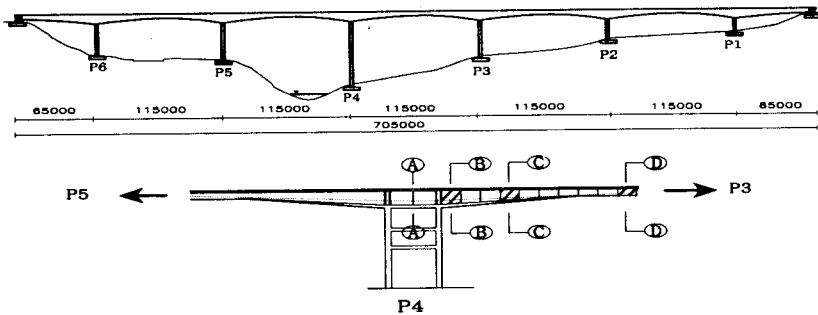


그림 5 황성대교 현황도

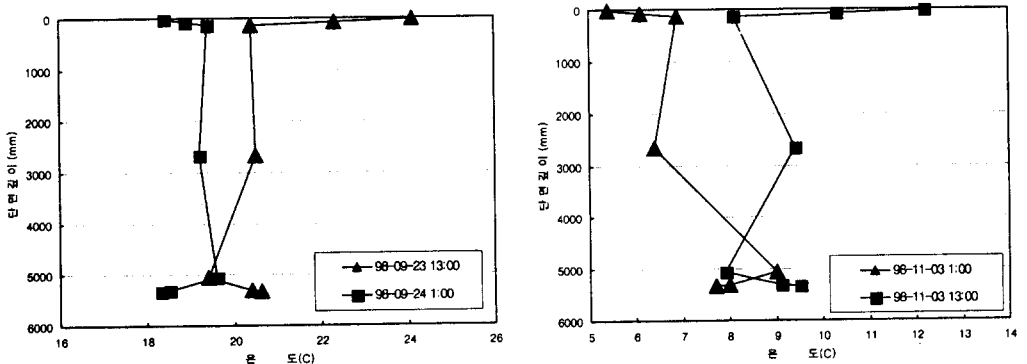
3.2 측정결과

3.2.1 개단면에 대한 측정결과

개단면에 대한 측정은 시공단계에 따라 여름(9월) 및 가을(11월)에 실시되었다.

1999년 9월 22일부터 24일까지의 측정에서는 기상상태가 구름이 없는 맑은 날씨였기 때문에 교량 구조물이 많은 태양 복사에너지를 받아 단면내의 온도차이가 비교적 큰 것으로 측정되었다. 단면내의 최고온도는 상부슬래브 표면에서 약 28.2℃로 측정되었고, 복부의 외측표면에서의 온도는 24.2℃로 측정되었다. 또한, 단면내의 최소온도는 13~15℃ 정도인 것으로 측정되었다.

그림 6은 1998년 9월 23일 및 11월 3일에 측정한 전단부 박스단면의 높이에 따른 온도경사를 보여 주고 있다. 박스단면내의 깊이에 따른 최대 온도차이는 5℃ 내외로 나타났다. 이 온도차이는 시방서에 규정하고 있는 설계시의 단면깊이에 따른 온도차이와 유사한 크기이다. 이와 같이 시공단계 즉 폐합되지 않은 상태에서 단면 깊이에 따른 온도차이가 적은 것은 외부의 공기가 박스내부로 자유롭게 이동할 수 있기 때문이다. 하지만 폐합단면에서는 박스내부와 외부의 공기의 대류가 차단되어 있기 때문에 단면 깊이에 따른 온도차이가 훨씬 크게 발생할 것으로 판단된다.



(a) 전단부 세그먼트 2(9월 23~24일 측정)

(b) 전단부 세그먼트 2(11월 8일 측정)

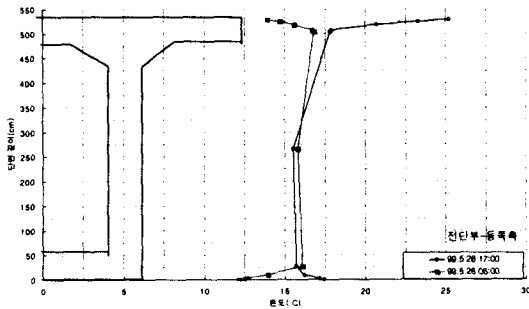
그림 6 개단면에서의 단면내 온도경사

3.2.2 폐단면에 대한 측정결과

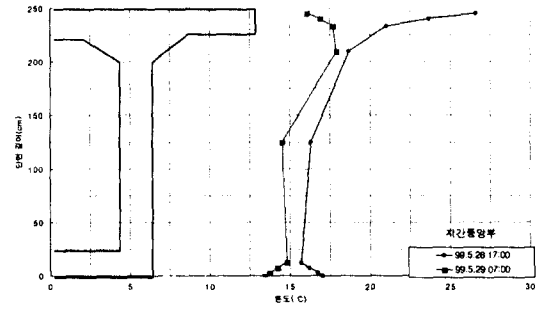
폐단면에 대한 측정은 봄(5월) 및 여름(9월)에 실시되었다.

1999년 5월 26일부터 29일까지의 측정기간동안에는 대기의 최대온도가 약 20°C이고 최저온도가 약 7°C로서 일교차가 약 13°C이었으며 박스 단면내의 온도차이는 주간에는 외측면의 온도가 약 10°C 더 높고, 해가 뜨기 전인 6시를 전후에는 반대로 내측면의 온도가 약 5°C 높은 것으로 나타났다. 대기의 최대온도는 오후 14:30 경에 발생하였고 단면내 콘크리트의 최대온도는 약 3시간이 경과한 17:00 정도에 최대온도에 도달하는 경향을 보이는데 이것은 콘크리트의 열전도가 작기 때문이다. 대기온도가 최대 20.5°C일 때 상부플랜지 표면근처에서의 온도는 약 26°C로서 대기온도보다 높게 나타났는데, 이것은 교량의 교면이 아스팔트로 포장되어 있어 태양에너지의 복사량이 많기 때문인 것으로 보인다.

단면이 큰 전단부(B-B 단면)와 단면이 작은 중앙부(D-D 단면)에서 측정한 박스거더의 단면 깊이별 주간 및 야간에서의 온도차이를 그림으로 나타낸 전단부 및 지간 중앙에서의 박스단면 깊이에 따른 온도분포(경사)는 그림 7과 같다. 그림 7(a)는 5월에 측정한 결과를 나타낸 것으로 일교차가 약 13°C인 국내의 기상조건에서 측정한 단면 깊이에 따른 온도차이는 도로교표준시방서에 규정하고 있는 값보다 큰 것으로 나타났다. 도로교표준시방서에는 상부슬래브와 복부사이의 온도차이를 5°C로 규정하고 있으나, 측정결과에 의하면 주간에는 상부슬래브의 온도가 복부의 온도보다 약 10°C 높은 것으로 나타났고, 반대로 야간에는 복부의 온도가 상부슬래브보다 약 2°C 정도 높은 것으로 나타났다.



(a) 전단부에서의 단면내 온도경사



(b) 지간중앙부에서의 단면내 온도경사

그림 7 폐단면에서의 단면내 온도경사(5월 측정)

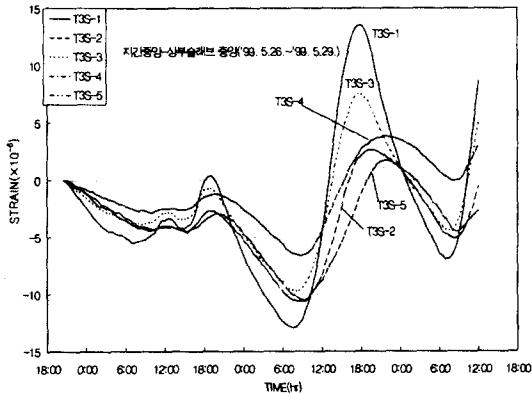


그림 8 상부슬래브 중앙부에서의 횡방향 콘크리트 변형률(5월 측정)

그림에 나타난 온도경사에서 최고온도는 상부슬래브의 상부표면에서 2.5cm 안쪽지점에서 측정한 결과로 상부슬래브의 상부표면에서 이보다 훨씬 높은 것으로 판단된다. 따라서 실제의 단면깊이에 따른 온도차이는 그림에 나타난 것보다 더 클 것으로 사료된다.

9월에 측정한 결과는 단면내 온도차이가 약 7°C로 5월에 측정한 것보다는 작게 나타났는데 그 이유는 9월에 측정할 때의 최대온도가 5월에 측정할 때보다 높았지만 일교차는 약 8°C로 낮았기 때문이다. 이 결과로부터 단면내의 온도차이는 절대온도의 크기보다는 일교차가 더 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 이와 같은 박스단면의 깊이에 따른 온도차이는 기상조건에 따라 다른 양상을 보이므로 국내에서 발생할 수 있는 최고의 악조건에서 측정할 경우에는 더 큰 온

도차이를 보일 것으로 판단된다.

측정한 박스단면내의 온도경사는 ASCE(1981)나 BS5400(1978) 규정에서 제시한 온도분포와 비슷한 양상을 보이고, 설계시 사용하는 시방서에 규정하고 있는 온도분포(5℃)보다 상당히 큼을 알 수 있다. 따라서 국내의 지역을 대표할 수 있는 다양한 지역 및 서로 다른 기상조건에서 박스단면내의 온도차이에 대한 측정과 분석을 통해 우리나라의 지형조건과 기후조건에 맞는 설계온도 규정을 정립하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

99년 5월에 측정한 온도변화에 의해 발생하는 박스거더교의 중앙부(D-D단면) 각 단면에서의 콘크리트 변형률의 경우 슬래브의 윗면은 약 $30\mu\text{mm/mm}$ 범위내에서 변형률이 인장영역에서 압축영역까지 변하는 것으로 나타났다(그림 8). 횡성대교의 콘크리트 압축강도가 400kg/cm^2 이상이므로 온도변화에 의해 발생한 단면내의 변형률은 약 9kg/cm^2 의 응력을 발생시키는 것으로 판단된다. 온도변화에 의해 발생하는 응력은 비록 인장강도에 비해 작으나 활하중이나 그 외의 다른 하중과 같이 작용하는 경우에는 인장강도를 초과할 가능성이 있다. 이와 같은 측정 결과는 다른 연구자들의 연구결과와 유사한 경향을 보이고 있다.

4. 결 론

PSC 박스거더교의 단면내 온도분포 및 온도응력에 대한 연구를 수행하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 실교량에 대한 온도측정결과에 의하면 일교차가 13℃ 정도인 경우에 단면의 깊이에 따른 온도경사는 10℃ 이상인 것으로 나타났다.
- 2) 온도변화에 의해 발생하는 단면내의 응력은 주야를 주기로 인장과 압축이 반복되는 현상을 보이며, 인장응력의 크기는 콘크리트 인장강도의 약 30%에 해당하는 것으로 나타났다.
- 3) 따라서, 온도변화에 의해 발생하는 인장응력이 콘크리트의 인장강도 이하여서 그 자체만으로는 균열이 발생하지 않는다 하더라도 차량하중이나 다른 활하중 또는 고정하중에 의한 응력과 같이 작용을 하는 경우에는 단면내 취약부분에 균열을 발생시킬 가능성이 있는 것으로 나타났다.

본 연구에 의하면 국내의 PSC 박스거더교량의 단면내 온도분포는 도로교표준시방서에 규정하고 있는 온도경사 5℃보다 상당히 큰 10℃ 이상으로 나타났다. 따라서, 국내의 대표지역에 대한 온도분포 특성 규명을 체계적인 연구를 수행하여 국내실정에 적합한 설계온도하중에 대한 규정을 정립할 필요가 있고, 또한 온도하중에 의해 발생하는 종방향 균열을 억제하기 위한 합리적인 횡방향설계기법을 정립할 필요가 있는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 도로교표준시방서, 건설교통부, 1996
2. Emerson M., "Temperature Differences in Bridge : Basis of Design Requirements", TRRL Report No LR 765, Transport and Road Research Laboratory, England, 1977.
3. Prisstley M.J.N., "Linear Heat Flow and Thermal Stress Analysis of Concrete Bridge Decks", Research Report , Univ. of Canterbury, Christchurch, 1976, pp. 24.
4. British Standard Institution, BS5400, "Steel Concrete and Composite Bridges, Part 2 ; Specification for Loads", London, Eight Parts, BS5400.
5. American Association of State Highway Officials(AASHTO) (1989) Guide Specifications for Thermal Effects in Concrete Bridge Superstructures, Washington D.C., U.S.A.