

# 1 반일체식 교대 교량의 거동 평가

글 장재운 \ 토목기술부 사원 \ 전화 02-3433-7771 \ E-mail jwjang@ssyenc.com  
글 김상호 \ 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 \ 전화 02-2123-2804 \ E-mail sanghyo@yonsei.ac.kr  
글 박영호 \ 한국도로공사 도로교통연구원 연구위원 \ 전화 031-371-3341 \ E-mail pyh9946@naver.com

## 1. 개요

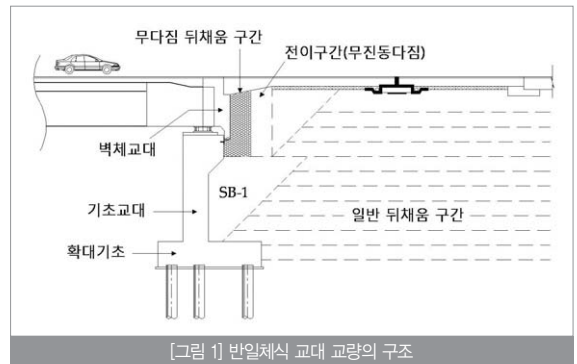
현재 국내에 건설되어 공용중인 교량은 온도 변화에 의해 발생하는 상부구조물의 온도신축량을 교량의 교대에 전달시키지 않고 지간 또는 거더 내에서 해소할 수 있도록 기계적인 신축이음장치 또는 신축조인트를 거더와 교대 사이에 설치하고 있다. 신축이음 장치는 주행차량의 지속적인 하중에 의한 파손 등으로 주행성능 저하, 소음 등을 일으키며, 신축이음부에 제설제와 우수가 누수되어 교좌장치의 성능저하와 교대오염을 발생시키는 것으로 보고되고 있어, 이를 보수하기 위하여 신축이음장치의 교체가 요구되기도 한다.

이러한 유지관리와 사용성의 문제들을 해결하기 위하여 1930년대 이후 미국, 캐나다 등을 중심으로 신축이음장치나 교좌장치를 설치하지 않는 일체식 교량이 제안되었다. 일체식 교량은 유럽과 북미에서 많이 건설되고 있는데, 유럽의 경우 중소지간 교량을 대상으로 많은 교량들이 건설되고 있으며, 북미에서는 386m의 다경간 장연장의 교량에도 적용된 사례가 있다.

특히, 영국의 경우 2000년대 이후 고속도로 상의 교량 중 반일체식 교대 교량의 비율이 전체교량의 20%를 웃도는 것으로 나타났고, 미국의 경우 2004년 FHWA(연방도로관리청)의 조사결과에 따르면 사용되고 있는 전체의 일체식 교대 교량의 개소가 약 13,000 개소에 달하며 이중 반일체식 교대 교량은 약 4,000 개소로 30% 이상이 건설되고 있다.

일반적인 조인트 교량은 온도변화로 인해 발생하는 상부구조물의 신축팽창을 신축이음장치와 교좌장치를 통해 흡수하도록 한다. 이

에 반해 일체식 교량은 신축이음장치나 교좌장치를 설치하지 않고 상부구조를 교대와 일체로 시공하여 신축팽창에 따라 발생하는 변위를 교량시스템 내에서 허용하게 한다. 이러한 일체식교량은 상부구조와 교대의 일체화 방법에 따라 완전일체식 교대 교량과 반일체식 교대 교량으로 분류되는데, 완전일체식 교대 교량은 상부구조와 하부구조가 모두 교대와 일체화 되는 형식이고, 반일체식 교대 교량은 [그림 1]과 같이 상부구조와 일체로 시공되는 낮은 높이의 벽체교대를 가지며 독립된 하부구조를 가지는 형식이다.



[그림 1] 반일체식 교대 교량의 구조

특히, 반일체식 교대 교량은 교량 구간 내에 신축이음장치를 설치하지 않아 초기공사비가 저렴하고 유지관리 측면에서 경제적인 교량형식이지만 아직까지 반일체식 교대 교량에 대한 이해와 연구가 부족하고 적용사례가 많지 않은 실정이다.

따라서 본고에서는 국내 최초로 건설된 반일체식 교대 교량인 춘

천-양양간 고속도로상의 동흥천IC 육교 [그림 2]의 시공 계획결 과를 분석하여, 반일체식 교대 교량의 설계 및 시공시 고려할 사 항에 대한 결과를 제시하였다.

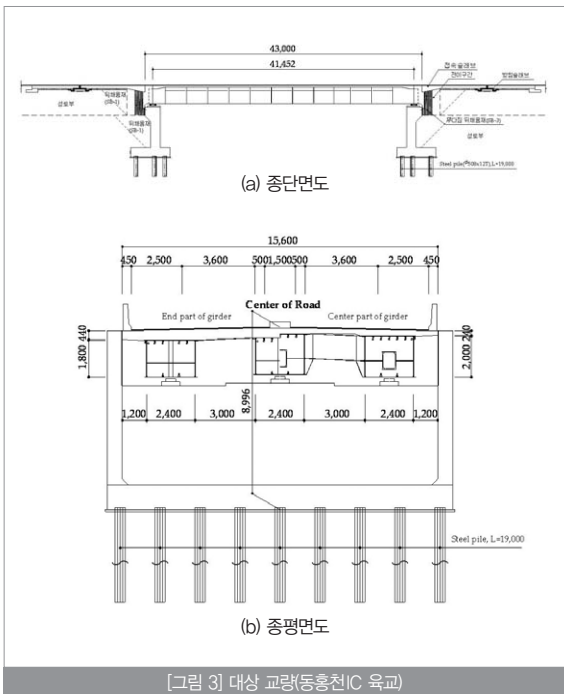


[그림 2] 반일체식 교대 교량(동흥천IC 육교)

## 2. 대상 교량 및 계측

### 2-1. 대상 교량의 제원

본 연구의 대상 교량인 동흥천IC 육교는 [그림 3]과 같이 3개의 강박스거더를 가지는 단경간의 반일체식 교대 교량이다. 대상 교 량의 교장은 43m, 시간장은 41.342m, 폭원은 15.6m, 사각은 8° 이다. 상부구조는 [그림 3-(b)]와 같이 각 거더의 폭이 2.4m, 단부 높이는 1.8m, 중앙부 높이는 2m, 상부슬래브 두께는 단부에서 500mm, 중앙부에서 300mm로 이루어져 있다. 대상 교량의 강



[그림 3] 대상 교량(동흥천IC 육교)

박스거더 주부재 및 부부재는 각각 SM490, SM400 강종을 사용 하였으며, 슬래브 및 벽체교대는 설계압축강도가 27MPa인 콘크 리트가 사용되었다.

벽체교대에 작용하는 배면토압은 반일체식 교대 교량의 주요 설 계인자이며 뒤채움재의 종류에 따라 토압의 크기가 달라지게 되 어 반일체식 교대 교량의 거동에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 벽체교대 배면을 무다짐 뒤채움 구간과 전이구간, 다짐구간으로 구분하며, 본 대상교량의 경우 무다짐 뒤채움 구간에는 SB-3가, 전이구간 및 기초교대 배면에는 SB-1이 사용되었다(표 1) 참조). 또한 교차받침은 강박스거더의 신축팽창에 의한 변위를 수용하기 위하여 탄성받침을 사용하였다.

표 1 교대 뒤채움재

구분	단위중량(kN/m <sup>3</sup> )	내부마찰각(°)	
일반 뒤채움재	SB-1	19.0	35
무다짐 뒤채움재	SB-3	15.3	35

### 2-2. 계측위치 및 계측방법

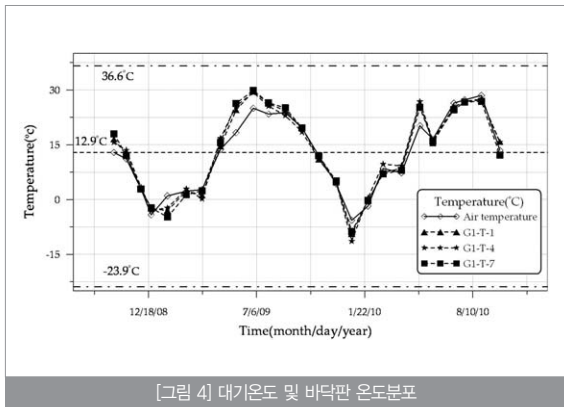
강박스 반일체식 교대 교량은 외부의 온도변화에 따라 변화하는 작용토압이 교량의 전체적인 거동에 영향을 주게 되므로, 온도변 화에 따른 상부구조물의 거동 파악이 매우 중요하다. 따라서 온도 변화에 따른 상부구조의 변위 및 변형률의 분포와 교대 배면에 작 용하는 토압을 계측하였다. 이를 위해 교대부 강박스거더 하부와 상부 바닥판에 외기용 온도계를 각각 설치하고, 벽체교대 내부와 강박스거더 내부에 변형률 게이지를 길이방향으로 설치하였다. 또 한, 교축 및 교축직각방향의 변위를 계측하기 위한 변위계를 교대 지점부 4개소에 설치하였으며, 벽체교대 배면에 토압계를 각 교 대에 3개소씩 설치하였다. 각각의 계측데이터는 강박스거더 설치 후 2년 10개월간 매달 1회씩 동일한 시간에 계측되었으며, 변 위의 경우 매시간 계측되었다.

## 3. 대상 교량의 거동 계측결과

### 3-1. 계측결과 및 분석

#### 1) 온도 계측결과

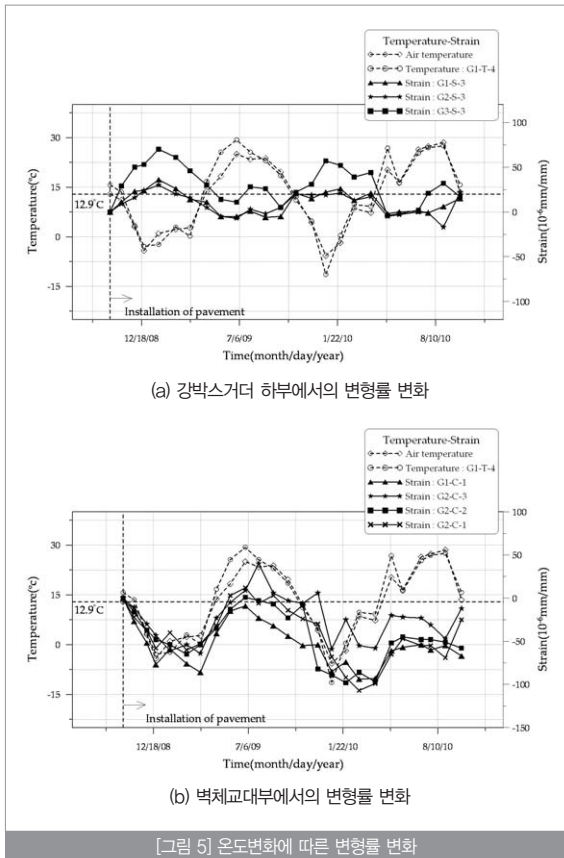
대상 반일체식 교대 교량의 강박스 설치 후 계측된 온도 분포는 [그림 4]와 같다. [그림 4]의 온도계측 결과는 대기온도와 바닥슬 래브의 교축방향으로 설치된 온도계에서 계측된 것이다. 대기온도 와 비교하여 바닥판의 온도는 태양의 일사를 직접적으로 받아 온 도변화가 대기온도보다 크게 나타났다.



[그림 4] 대기온도 및 바닥판 온도분포

## 2) 변형을 계측결과

일반적인 교량의 경우 온도변화에 의하여 무응력 상태의 변형률이 발생할 수 있지만, 반일체식 교대 교량은 온도변화에 의하여 벽체교대 배면에 토압이 발생할 경우, 작용토압에 의하여 상부구조물의 변형을 변화가 발생할 수 있다. 따라서 온도변화에 의한 대상교량 강박스거더의 변형을 변화를 파악하기 위해 [그림 5]와 같이 측정된 변형률을 온도변화와 함께 나타내었다.



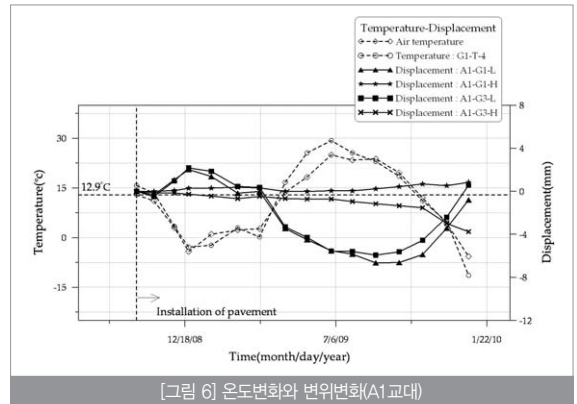
(a) 강박스거더 하부에서의 변형률 변화

(b) 벽체교대부에서의 변형률 변화

[그림 5] 온도변화에 따른 변형률 변화

## 3) 변위 계측결과

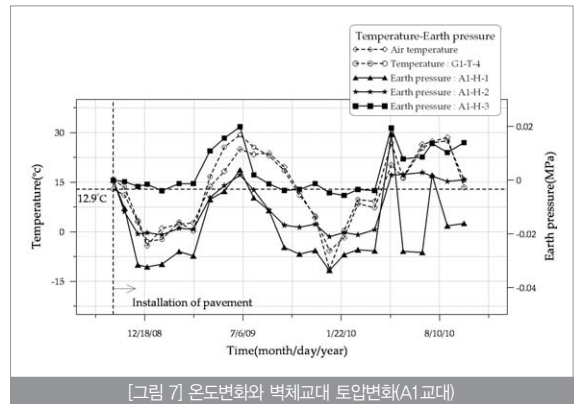
온도변화에 의하여 발생하는 상부구조물의 변위를 분석하기 위하여 시공완료 후의 변위변화를 온도변화와 함께 [그림 6]에 나타내었다. 그림과 같이 교축방향의 변위는 온도변화에 따라 증가와 감소가 명확하게 나타났으며, 교축직각방향의 변위는 온도변화에 따라 미소하게 나타났다. 변위계 설치위치에 대하여 각각의 계측위치에 따라 교축방향으로 약 6mm에서 약10mm의 범위로, 교축 직각방향으로 약 0.5mm의 변위로 팽창수축 변형이 발생하고 있음을 알 수 있다.



[그림 6] 온도변화와 변위변화(A1교대)

## 4) 토압 계측결과

반일체식 교대 교량에서 온도변화에 의해 나타나는 벽체교대의 토압을 확인하기 위해 [그림 7]에서와 같이 토압을 온도변화와 함께 비교하여 나타내었다. 그 결과 토압은 온도가 증가할수록 증가하고 온도가 감소할수록 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 계측된 토압 크기의 변화 범위는 약 0.03MPa의 수준으로 매우 작게 나타나는 것으로 확인되었다. 이는 반일체식 교대의 경우 벽체교대 높이가 일반적인 교대의 높이보다 상대적으로 낮아서 매우 작



[그림 7] 온도변화와 벽체교대 토압변화(A1교대)

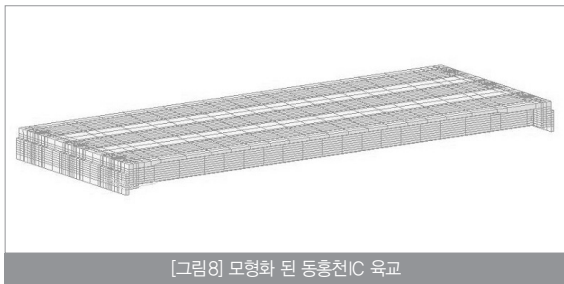
은 토압이 작용하는 것으로, 이러한 매우 작은 토압은 구조물의 거동에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

## 4. 대상 교량의 구조해석

강박스 반일체식 교대 교량의 거동을 평가하고 계측결과와 비교 분석하기 위하여 대상 교량에 대한 구조해석을 수행하였다.

### 4-1. 모형화

구조해석은 일반적인 구조해석에 널리 사용되어 정확성과 적응성이 검증된 범용 유한요소해석 프로그램인 MIDAS Civil을 사용하였다. 강박스 반일체식 교대 교량의 구조적 특성상 상부구조와 벽체교대가 일체화 되어 있기 때문에 이를 정확하게 반영하여 모형화 하기 위해 강박스거더는 Plate 요소로 벽체교대 및 상부슬래브는 Solid 요소로 모형화하였고, 탄성받침의 수직 및 수평강성을 모사하기 위해 Elastic Link 기능을 사용하여 탄성받침을 모형화하였다(그림 8 참조).



온도변화에 의해 발생하는 토압의 효과를 반영하기 위하여 모형화에 적용된 온도하중은 설계기준에 제시된 최고, 최저 온도 및 계측을 통하여 측정된 대기온도를 적용하여 완공시 온도(12.9℃)를 기준으로 -20℃~40℃에 대하여 대상교량을 평가하였다. 반일체식 교대 교량의 경우 일반적인 교량에서와 달리 온도변화에 의한 상부구조물의 신축과 이에 의해 발생하는 교대 배면토압이 상호적으로 작용하게 된다. 따라서 이를 고려하기 위하여 주동 토압 및 정지토압은 Rankine의 주동토압계수 및 정지토압계수를 적용하였고, 수동토압은 Dicleli의 수정된 수동토압계수를 적용하였다(식(1) 참조).

$$K = \frac{2K_o + \alpha\delta TL_d \Phi}{2 + \frac{L_d h^2 w_e r_s \Phi}{2E_g(A_g + nA_s)}} \leq K_o \quad \text{----- 식(1)}$$

## 4-2. 계측결과와 구조해석결과 비교

### 1) 시공단계별 변형을 및 응력 비교

대상 교량의 시공단계를 고려한 구조해석 결과를 계측결과와 비교하여 <표 2>에 나타내었다. 대상 교량의 경우 강박스거더 설치 시 강거더의 변형률이 계측되지 않았으므로 강박스거더 자중에 의하여 발생하는 변형률은 구조해석을 통하여 계산하고 이를 계측결과에 포함시켜 시공단계별 변형을 변화를 평가하였다. <표 2>에 나타난 바와 같이 시공단계별 측정된 변형률 및 응력은 구조해석 결과와 매우 유사하게 나타나므로 시공단계 이후의 발생하는 온도변화에 의한 반일체식 교대 교량의 거동 계측결과는 구조해석 결과와 비교하여 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

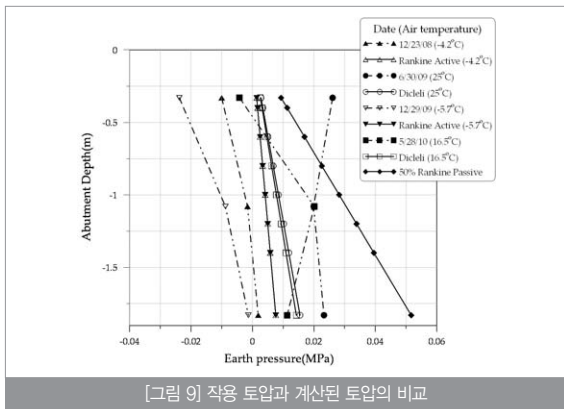
표 2 시공단계별 변형률 및 응력 분포

시공 단계	계측 위치	G1 girder	
		Strain(10-6) Measurement /Analysis	Stress(MPa) Measurement /Analysis
강박스 설치	2m	- /-117	- /-24.19
	1.55m	- /-66	- /-13.70
	0m	- / 103	- /21.15
중앙부 슬래브 타설	2m	-446/-467	-93.28/-96.17
	1.55m	-244/-269	-50.87/-55.45
	0m	447/430	93.39/88.51
단부 슬래브 & 벽체교대 타설	2.3m	-20/-29	-0.50/-0.71
	2m	-16/-21	-0.40/-0.52
	2m	-440/-465	-92.02/-95.77
	1.55m	-261/-269	-54.44/-55.47
	0m	431/423	90.03/87.09
교대 배면 뒤채움 직후	2.3m	-24/-26	-0.59/-0.63
	2m	-21/-20	-0.51/-0.5
	2m	-454/-465	-94.96/-95.81
	1.55m	-254/-271	-52.97/-55.79
	0m	442/417	92.34/85.82
포장 및 방호벽	2.3m	-67/-70	-1.65/-1.72
	2m	-31/-45	-0.76/-1.12
	2m	-457/-479	-95.59/-98.60
	1.55m	-259/-268	-53.24/-55.24
	0m	507/470	105.99/96.76

### 2) 벽체교대에 작용하는 토압 비교

반일체식 교대 교량은 온도변화에 의하여 발생하는 구조물의 변위와 이에 따라 발생하는 교대 배면토압이 상호작용을 하므로, 벽

체교대에 발생하는 토압의 계측결과를 Rankine의 주동토압 계산 결과와 Dicleli의 수정된 수동토압 계산결과와 비교할 필요가 있다. 일체식 교량 설계지침에 따르면 일체식 교대 교량의 수동토압을 Rankine의 수동토압의 50%로 규정하고 있어 이 결과 또한 함께 비교하였다. [그림 9]에서와 같이 계산된 Rankine의 주동토압과 Dicleli의 수정된 수동토압은 계측된 토압과 유사한 수준으로 나타나는 반면, Rankine의 수동토압 50% 값은 계측결과보다 크게 평가되고 있음을 알 수 있다. 따라서 구조해석시 Dicleli가 제안한 수정된 수동토압을 구조해석에 반영하여 반일체식 교대 교량의 거동을 평가하였다.

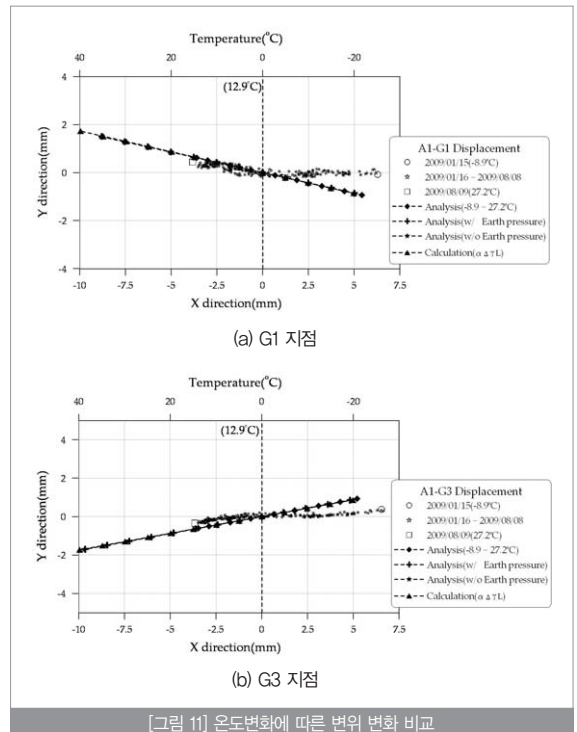
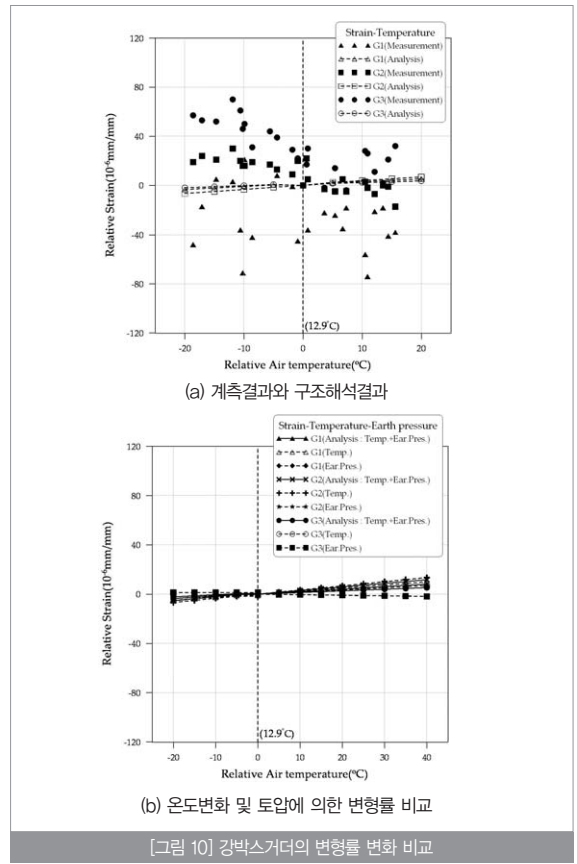


### 3) 온도변화에 따른 변형을 변화 비교

온도변화에 의한 강박스거더 하부의 변형을 변화를 확인한 결과, [그림 10-(a)]와 같이 온도상승에 대하여 미소하게 인장변형률이 나타나고 온도하강에 대하여 미소하게 압축변형률이 나타났다. 이는 강재와 콘크리트의 열팽창에 의해 나타나는 변형을 변화도 포함된 결과이다. 이에 변형을 변화에 영향을 미치는 주요 인자를 확인한 결과, [그림 10-(b)]와 같이 온도변화 및 토압이 작용할 경우, 온도변화만 작용할 경우, 토압만 작용할 경우로 구분하여 나타낸 결과 온도변화에 의한 변형을 변화가 지배적인 것으로 나타났다. 이는 벽체교대에 작용하는 토압이 강박스거더의 변형을 변화에 미치는 영향이 적음을 의미하며, 벽체교대 배면에 무다짐 뒤채움재가 사용되고 교대 높이가 낮아 토압의 크기가 작기 때문인 것으로 판단된다.

### 4) 온도변화에 따른 변위 변화 비교

대상교량의 온도변화에 의한 변위를 확인하고자 완공시 온도 12.9°C를 기준으로 온도분포가 -8.9~27.2°C에서의 변위분포를 계측 결과와 구조해석 결과를 비교하여 [그림 11]에 나타내었다. 또한




설계온도분포가  $-20\sim 40^{\circ}\text{C}$ 에서의 변위분포를 토압을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여 [그림 11]에 나타내었다. 그 결과, 온도변화에 따른 대상교량의 계측변위는 구조해석 결과와 매우 유사한 결과를 나타내고 있음을 확인 할 수 있으며 구조해석결과에서 토압이 작용하더라도 대상교량에서 나타나는 변위는 온도 변화만 있을 경우와 구조물의 온도변형관계에 따라 계산된 결과와 비교할 때 그 영향이 매우 작은 것을 알 수 있다. 이는 작용 토압의 크기가 매우 작아 온도변화에 의해 발생하는 변위를 구속할 만큼 토압의 크기가 크지 않음을 알 수 있다. 또한 열변형공식을 이용하여 계산된 결과와 비교하여 볼 때 대상교량은 일반적인 조인트 교량과 유사한 거동을 나타내고 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

본고에서는 반일체식 교대 교량의 거동을 분석하고 온도변화에 의하여 벽체교대에서 발생하게 되는 토압의 영향을 확인하기 위하여, 반일체식 교대 교량의 온도, 토압, 변형률, 변위의 계측결과를 구조해석 결과와 비교 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 외부 온도변화로 인하여 반일체식 교대 교량의 벽체교대에서 나타나게 되는 수동토압의 크기는 벽체교대 배면에 사용된 무다짐 뒤채움재와 낮은 높이의 벽체교대로 인하여 계측결과 및 Rankine의 주동토압과 Dicleli가 제안한 수동토압 등에서 0.05MPa이하의 매우 작은 수준의 토압이 작용하는 것으로 나타났다.
- 2) 이러한 수준의 토압이 반일체식 교대 교량에 작용하더라도 강박스거더 단면에서 발생하는 변형률의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 토압이 작용하지 않는 상태에서 순수한 온도변화에 의하여 강박스거더에 발생하는 변형률은 토압과 온도변화가 동시에 작용하는 경우와 유사한 수준으로 평가되었다.
- 3) 온도변화에 따른 반일체식 교대 교량의 변위는 변형률 변화관계에서와 같이 온도변화에 의하여 구조물에서 발생하는 온도변위를 구속할 만큼 토압의 크기가 크지 않으므로, 온도변화에 따른 반일체식 교대 교량의 변위는 일반 조인트교량과 유사한 수준으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 변위 수준은 식을 통해 계산된 변위량과도 유사하다.
- 4) 따라서 반일체식 교대 교량은 온도변화에 의하여 발생하는 토

압의 영향이 매우 적어서 발생하는 변위를 충분히 수용할 수 있으므로 신축 조인트가 없는 반일체식 교대 교량의 활발한 적용이 가능할 것으로 판단된다.

반일체식 교대 교량은 신축조인트 제거 등으로 직접공사비 및 유지관리 비용의 절감을 기대할 수 있는 교량형식으로 향후 다양한 연구 및 시공경험을 통하여 경제적이고 합리적인 교량형식으로 제안될 수 있을 것이다. 

### 참고문헌

- ① 대한토목학회 (2008), 도로교 설계기준 해설.
- ② 박영호 (2009), "무조인트 교량의 개요 및 소개", 한국지반공학학회지, 한국지반공학회, Vol. 25, No. 7, pp. 8~10.
- ③ 박영호, 김낙영, 이병주, 이원태 (2008), "반일체식 교대 교량의 실용화 연구", 한국도로공사, 도로교통연구원 연구보고서.
- ④ 한국도로공사 도로교통연구원 (2009), "일체식 교량 설계지침", 한국도로공사.
- ⑤ Burke, Jr, M. P. (1994), "Semi-Integral Bridges : Movements and Forces", Submitted for Presentation at the Transportation Research Board's 73rd Annual Meeting
- ⑥ Dicleli, M. (2000) A Rational design approach for prestressed concrete girder integral bridges, Engineering Structures, Vol. 22, pp. 230~245.
- ⑦ Dicleli Murat, Albhaisi Suhail M. Performance of abutment-backfill system under thermal variations in integral bridges built on clay. Engineering Structures 2004;26:949-62.
- ⑧ Kunin J, Alampulli S. Integral abutment bridges current practice in United States and Canada. Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE 2000;14(3):104-11.
- ⑨ Arsoy, S., Duncan, J. M. and Barker, R. M. Behavior of a Semiintegral Bridge Abutment under Static and Temperature-Induced Cyclic Loading. Journal of Bridge Engineering, ASCE 2004; 9: 2:193-199
- ⑩ Bettinger, C. L. Effects of Thermal Expansion on a Skewed Semi-Integral Bridge. Master's Thesis. Department of Civil Engineering, Ohio University, Athens, Ohio; 2001.