

H-말뚝을 이용한 일체식교대 교량

Integral Bridge Using H-pile

정경자¹⁾, Gyung-Ja Jung, 김성환²⁾, Sung-Hwan Kim, 유성근³⁾, Sung-Kun You

- 1) 한국도로공사 도로연구소 연구원, Researcher, Highway Research Center, KHC
- 2) 한국도로공사 도로연구소 수석연구원, Research Director, Highway Research Center, KHC
- 3) 동아건설산업(주) 기술연구소 책임연구원, Chief Researcher, Institute of Technology of Dongah

SYNOPSIS : The existing bridge with deck joint has many problems during construction and maintenance. To overcome these difficulties, an integral bridge, which is defined as the practice of constructing bridges without deck joints, is proposed in this study. A test bridge with 3 spans of PC beam was selected to verify the function of the bridge and is under construction.

Characteristics of integral bridge are followings: ① Flexible H-piles under the abutment are installed to accommodate thermal movements of the superstructures of bridge. ② PC beam of the superstructure and the abutment are integrated. ③ The existing approach and relief slabs are applied to minimize the stress transfer occurred from the bridge deck to the pavement. ④ A cyclic control joint is installed between approach and relief slabs to absorb the thermal movement. ⑤ It is used a dual direction bearing which is cheaper than single direction bearing and has a good workability as well. It is also installed a shear block on the top of pier coping to protect the lateral movement caused by temperature change and earthquake.

Key words : integral bridge, deck joint, flexible H-pile, elastic rubber pad, approach and relief slabs, cyclic control joint, shear block

1. 서론

교량의 유지관리 측면에서 일반적으로 가장 문제가 되고 있는 부분은 상판 신축이음부의 파손이다. 이 부분은 교량의 구조역학적인 측면에서 꼭 필요한 구성요소로써 일단 손상이 발생하면 많은 경우에 있어서 바로 직하면에 위치한 교좌장치 작동을 방해하여 전체 교량 구조계에 악영향을 미치게 된다. 또한 신축이음부를 통하여 제설제와 같은 이물질이 흘러들어 부식을 초래함으로써 교량의 수명을 단축시킨다. 일단 신축이음부가 손상되면 주행중인 차량의 충격하중을 증대시켜 신축이음부의 파손은 가속화 되고 결국 이의 보수를 위하여 차량의 통행을 제한해야 한다. 이와 같은 문제의 해결은 신축이음장치 자체의 성능 향상만으로는 한계가 있으므로 교량에서 신축이음장치 요소를 제거하고 그 역할을 교량의 다른 구성요소가 담당하도록 함으로써 가능할 수 있다. 최근에 일반 교량에서 고정점으로 설계되어온 교대말뚝이 유연한 거동을 함으로써 신축이음장치의 역할을 할 수 있도록 하는 무조인트교량을 시험시

공하여 실용화하기 위한 연구가 진행 중에 있다. 본 논문에서는 국내에서의 설계기준을 반영하여 시험 시공 중에 있는 무조인트교량의 특성과 기초의 거동에 대해서 알아보고자 한다.

2. 무조인트교량의 개념

2.1 무조인트교량의 정의

무조인트교량이란 교량 전체에 신축이음장치를 두지 않고 상부구조를 교대에 매입하여 일체화 시킨 일체구조 형식의 교량을 말한다(그림1 참조). 그래서 단순히 포장층의 연속화만을 고려한 교량과는 상이하다. 조인트가 존재하지 않으므로 무조인트교량(Jointless Bridge)이라고 하며, 상부구조, 말뚝, 교대가 일체로 구성되어 있기 때문에 일체식교량(Integral Abutment Bridge)이라고도 부른다.

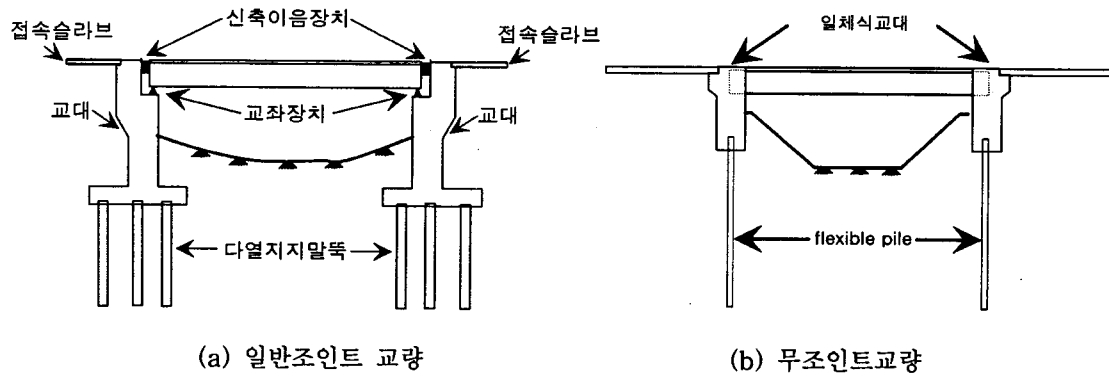


그림 1. 무조인트교량과 일반 조인트교량의 비교

2.2 무조인트교량의 특성

2.2.1 무조인트교량의 거동

무조인트교량은 상부구조와 교대가 일체식으로 연결되어 상부구조의 온도변화에 의한 신축을 교대에 일렬로 시공된 파일이 유연한 거동을 함으로써 조절하는 교량이다. 교각은 파일기초 혹은 직접기초의 형식을 취하며 교대와 마찬가지로 상부구조와 일체로 연결되기도 하나 일반교량과 같이 양방향 거동을 할 수 있도록 베어링을 사용하기도 한다. 일체식 교대 교량의 거동이 성립될 수 있는 가장 큰 이유는 교대와 말뚝이 신축이음장치를 대신해 유연하게 작동한다는 것이다. 이러한 유연성은 단면적이 작은 난쟁이 교대에 일렬 시공된 파일에 의해서 확보된다.

이러한 조건하에서 상부구조와 하부구조의 연결부는 사하중과 활하중이 작용시 구조적으로 힌지 거동을 한다. 난쟁이 교대를 지지하는 파일은 그 길이가 3m이상인 것을 사용하는데 그 이유는 상부구조의 모멘트를 감소시키는 역할을 수행하고 교대와 함께 파일의 유연성을 확보하기 위함이다. 교대 뒷채움으로 사용되는 재료는 교대의 이동을 용이하게 하고, 수동토압을 감소시킬 수 있는 재료를 사용한다. 또한 일체식교대 교량에서 사용되는 접속슬라브는 교량 상부구조에서 온도에 의한 변위와 하중을 전달하는 역할을 수행하며, 날개벽은 온도변위에 의한 교대이동시 교대를 원활하게 이동시키도록 일반조인트교량과 비교시 단면이 작은 것을 사용한다.

2.2.2 설계의 단순성

무조인트교량의 설계시에는 교대와 교각의 횡, 종방향 하중 저항에 관련한 설계를 일반적으로 실시할 필요가 없다. 이는 강성이 매우 큰 상부구조가 교대와 직접 연결되어있으며 교대는 다시 제방에 의하여 구속되므로 작용하중은 제방으로 전달되어 처리된다. 교대와 상부구조를 연결함으로써 발생 가능한 2차응력 효과(Secondary Effect: 건조수축, 크리이프, 수동토압 등)를 충분히 고려하여 설계를 실시하며 교대의 날개벽은 수동토압에 저항할 수 있도록 보강설계가 필요하다. 교각 설계에 있어서는 대부분 발생하는 상부구조의 수평하중을 교대가 부담함으로써 교각 위에서 작용하는 수직력(사하중 및 활하중)과 교각에 직접 작용하는 수평력(하천 유속으로 인한 하중, 또는 교각 매입으로 인한 토압 등)만을 고려하면 된다. 그러나 이러한 하중의 영향은 매우 작으므로 실제로는 일체식교대 교량의 교각 설계시에는 수직력만을 고려한 설계가 실시된다.

2.2.3 종방향 하중 저항력

일체식으로 건설되는 교량에서 온도변화에 의한 포장부의 종방향 하중은 교량상부구조와 상대적으로 단면적 차이가 많은 접속 슬래브를 통하여 전달되기 때문에 접속슬래브에서 높은 응력을 유발하여 국부적 파쇄 및 좌굴이 발생할 수 있다. 일체식교대 교량은 종방향 하중에 대하여 충분한 저항능력을 갖추고 있으며 접속 슬래브와 포장과의 경계면에 간단한 응력해소 조인트(Pressure Relief Joint)를 설치함으로써 이 같은 문제를 감소시킬 수 있다.

2.2.4 시공성

일반적으로 교대를 시공하기 위하여 굴착하여야 하는 깊이는 약 60 ~ 90cm를 초과할 필요가 없다. 무조인트교량은 교대가 세워질 부분의 토사를 모두 굴착 후 파일 및 교대구조물 공사를 실시하고 노면까지의 뒷채움 작업을 하는 것이 아니라, 우선 교대 제방부 성토를 실시하여 다짐을 한 후 기초와 교대부를 시공할 수 있다. 이러한 시공순서는 기존의 방법에 비하여 토공작업에 걸리는 공기를 월등히 줄일 수 있으므로 유리하다. 또한 조인트 교량의 정밀 시공을 요구하는 부분이 일체식교대 교량에서는 필요 없게 된다. 예를 들면 교좌장치 설치를 위한 높이, 경사, 교좌위치의 확보등은 일반 조인트 교량과 같이 더 이상 중요한 사항이 아니다.

2.2.5 내진성

일체식교대 교량의 양쪽 교대는 상부구조와 함께 고정되어 있어 지반과 동시에 거동함에 따라 상대변위가 적어 지진하중에 대하여 기존 조인트 교량보다 유리하다. 그리하여 지진 활동이 매우 활발한 지역에서 타교량 형식보다 적용성이 뛰어나 미연방도로국(FHWA) 또한 그 활용을 적극적으로 권장하고 있다. 교대배면토와의 상호작용은 기초를 통하여 전달되는 상부구조의 종방향 지진거동을 감소시키는 역할을 하는데, 60m이하의 교량에 대한 실험 결과 상부구조의 종방향 모드에 대하여 15%정도의 감쇄작용을 함이 밝혀졌다. 또한 일반 조인트 교량과의 지진거동을 비교하면 가장 위험한 상황인 낙교에 대한 적용성이 매우 크며 이는 실제 미국 캘리포니아 주의 지진 피해 조사에 의하여 밝혀진 바 있다.

2.2.6 말뚝기초의 높은 응력 발생

무조인트교량 교대부의 수직파일은 온도변화에 의한 상부구조의 신축으로 발생하는 변위에 대하여 저항함으로써 조인트 교량과 비교시 상대적으로 보다 높은 휨 응력이 발생한다. 이러한 휨 응력은 무조인트교량의 연장이 길어짐에 따라 증가하여 파일 재료의 항복응력점에 도달하는 경우도 있다고 한다. 따

라서 이 같은 응력이 발생하게 되면 수직파일에는 교량 상부구조의 신축으로 발생하는 휨응력에 의한 소성 힌지가 파일부에 생성될 가능성이 존재한다. 이 같은 특성 때문에 일체식교대 교량의 교대부 파일은 특별한 시공제한 조건이 따르게 된다. 즉, 충분한 축하중 능력을 보유함과 동시에 국부적인 변형으로 발생하는 파일의 휨응력 또한 처리할 수 있는 파일기초 형식이어야 한다. 그러므로 90m이상의 일체식교대 교량에서는 이런 조건을 고려시 강재 H 파일이 가장 합리적 선택이라 할 수 있다.

2.3 무조인트교량 적용범위의 제한

일체식교대 교량은 그 적용성에 어느 정도 제한조건을 가지고 있다. 즉, 발생하는 수동토압의 제한, 일반적으로 사용되는 접속도로부의 응력해소용 조인트를 사용하기 위한 교량의 종방향 이동량의 제한, 곡선교에서의 사용 불가, 30°이상의 사교에서의 사용제한, 지반의 안정성이 불확실한 장소, 교대의 침하가 과도하게 발생하는 장소, 침수가 예상되는 장소는 부력 때문에 사용이 제한되고 있으나 이 규정은 특별한 조치가 없을 경우를 의미하며, 발생가능한 문제점들을 충분히 고려하였다면 위의 제한 조건에 상관없이 적용이 가능하다.

3. 무조인트교량 시험시공

3.1 설계의 기본개념

시험시공 교량은 연장 약 90m의 PC Beam 3경간 교량이다. 약 2.85%의 종단선형과 평면곡률(R=2000)이 존재하며 교각 아래에 농로와 수로가 있기 때문에 교량전체는 30°의 사각을 가지고 있다. 무조인트교량으로 설계시 이러한 조건을 최대한 수정없이 반영하였으며, 기타 교량의 세부설계에 있어서도 국내 일반교량의 설계조건을 만족하도록 하였다.

3.2 교대기초의 설계

3.2.1 말뚝배치

일반조인트 교량에서 말뚝기초를 사용할 때에는 교대가 고정 지지점이 되기 때문에 말뚝은 다열파일이나 경사파일을 사용한다. 그러나 일체식 교대 교량에서는 교대가 온도변위에 의하여 신축하므로 그 변위를 용이하게 할 수 있는 말뚝 배치가 필요하게 된다. 본 설계에서는 그러한 개념을 토대로 그림 2에서와 같이 말뚝을 교량진행방향으로 일렬배치하고 유연성 확보를 위하여 H-말뚝을 사용하여 말뚝의 약축을 또한 교량진행방향에 대하여 수직으로 배열함으로써 교대의 변위를 허용할 수 있도록 하였다.

3.2.2 거동해석

일체식 교대 교량에서 파일은 상부에서 전달되는 하중을 흡수하는 개념이고 이렇게 전달되는 하중은 교대, 말뚝, 지반의 복합거동이므로 그림3과 같은 모델로 하여 해석한다. 무조인트교량에서는 난쟁이교대를 사용하므로 교대 자체의 자중과 기초저판이 없으므로 기초저판이 있는 경우보다 흙의 자중이 감해져 교대말뚝의 본수가 상당히 줄어들게 된다.

말뚝머리의 작용력에 대한 H말뚝 본체의 안정성을 검토하기 위하여 무조인트 교량의 H말뚝의 비선형 거동을 고려한 해석(P-y Curve 이용)을 실시하였다. 해석에 사용된 전산해석 프로그램은 미 연방도로국(FHWA)에서 사용중인 COM624P를 사용하였다.

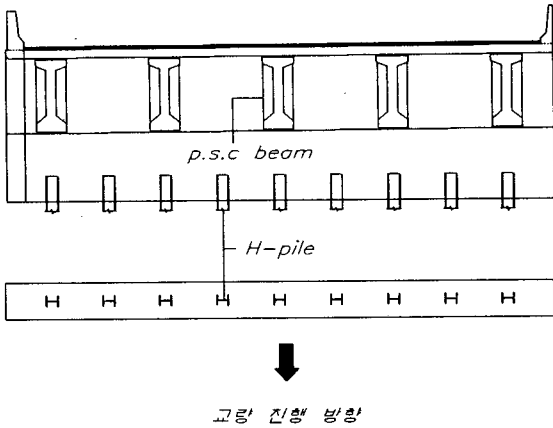


그림 2. 무조인트교량의 말뚝 배치

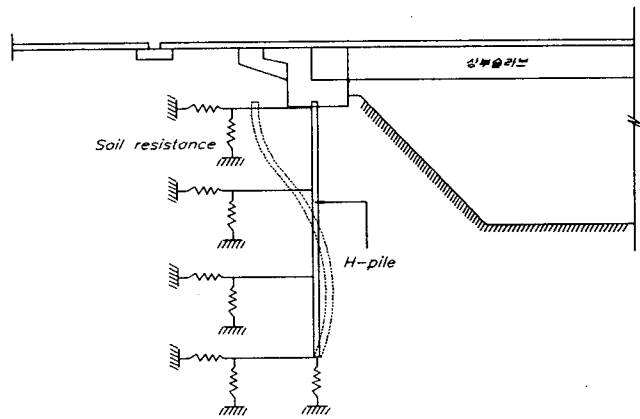


그림 3. 일체식 교대에서의 파일해석 모델

3.2.3 교량구조의 온도변화 변위에 따른 말뚝 본체 검토

무조인트교량은 PC Beam과 H 말뚝으로 지지되는 교대가 일체 시공되어 있으므로 상부구조가 신축이음으로 분리된 일반교량과는 다르게 상부구조의 온도 신축 변위에 대한 말뚝 본체의 검토가 필요하다.

PC Beam의 가설시의 온도가 상온 15°C인 경우, 설계 온도변화량을 고려하면 실온도 신축 이동량은 $1.817/2 = 0.908$ cm 정도가 발생하게 된다. 위의 조건을 고려하여 COM624P를 이용하여 해석을 실시하였으며 해석결과는 다음과 같다.

	수평변위	말뚝최대응력	비고
온도변위	0.4 in	0.195×10^9 psi	말뚝머리 자유단
	1.016 cm	1370 kg/cm^2	OK

3.2.4 말뚝머리 삽입부의 지압 응력 검토

말뚝머리의 회전고정 조건에 대한 변위에 대하여 H-Pile 삽입부는 충분한 저항력을 발휘 할 수 있어야 되므로 이에 대한 검토가 필요하다. 말뚝이 항복점에 이르렀을 때 말뚝캡부의 콘크리트에 작용하는 최대 휨저항력과 말뚝이 항복응력에 도달하였을 때의 지압압축응력을 비교한 결과 Pile Cap부내에 작용되는 지압응력은 설계강도 $\sigma_{ck}=240\text{kg/cm}^2$ 를 초과하지 않으므로 말뚝캡부는 충분한 저항력을 갖고 있다.

3.3 교대 설계단면

무조인트교량은 말뚝항타 후 말뚝캡의 역할을 하는 교대하부 콘크리트를 1차 타설한 후, 상부주형을 거치하기 위한 탄성고무판을 설치한다. 상부주형을 거치한 후 상부교대 콘크리트를 타설한다. 그림 4에 보이는 것과 같이 말뚝을 충분히 교대저면에 관입시켜 파일이 교대하부에서 회전하지 못하도록 한다.

A2 철근의 역할은 상부거더와 교대가 일체로 되어있으므로 발생하는 부모멘트에 대한 철근이고, A1 철근의 역할은 일반조인트 교량에서 다웰바의 역할 뿐만아니라, 온도의 영향에 의해 발생하는 교대의

변위를 접속슬라브 끝단에 있는 Cyclic Control Joint로 전달하기 위한 철근이다.

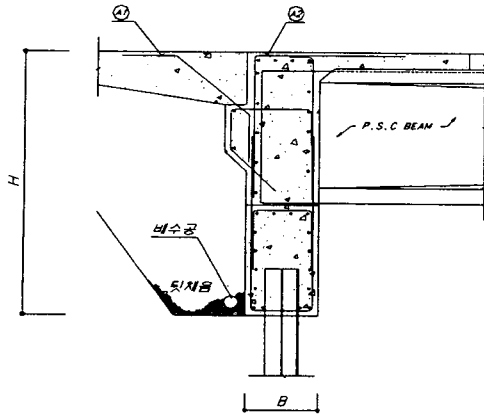


그림 4. 무조인트교량 교대단면

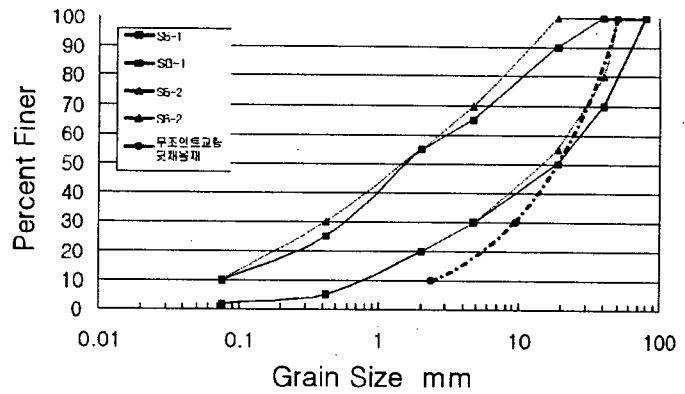


그림 5. 무조인트교량 뒷채움재 입도분포

3.4 교대 뒷채움

상부구조와 교대 연결부 설계의 가장 중요한 개념은 일체식교대(난쟁이교대)가 일반 조인트 교량과는 달리 교대 배면쪽으로 움직이므로 일반 조인트 교량의 교대 해석은 수동토압하에서 이루어지는 것에 비해 일체식 교대는 수동토압하에서 해석하여야 한다. 이때 발생하는 수동토압을 최소로 하여야만 이 교량의 구조 개념이 성립될 수 있으므로 교대단면이 일반교량에 비해서 작아야 한다. 본 설계에서 수동토압 P_p 는 Rankine의 수동토압개념을 사용하였다.

$$P_p = 1/2 \times \gamma \times K_p \times H^2 \quad (1)$$

(1)에서 수동토압을 최소로 하기 위해서는 수동토압의 작용높이 H 와 수동토압계수 K_p 를 최소로 하는 교대와 뒷채움 토사를 선정하여야 한다. 이를 위해서 본 설계에서는 일반조인트 교량에 비해 교대 구체의 높이가 상당히 작은 난쟁이 교대(보통 4m 이내)를 사용하였으며, 뒷채움 토사는 일반적인 뒷채움 토사와 비교시 내부마찰각 ϕ 을 최소로 하기 위하여 입도가 불량한 사석을 사용하는 것으로 한다. 본 교량에 사용할 뒷채움재는 그림3에 나타난 것처럼 SB-2에 비해서 규격이 크고 입도가 불량하다. 다짐은 지반반력계수 20kg/cm^3 이상인 경우 만족한 것으로 하는데 이는 교대의 거동시 수동토압의 발생을 최소화하기 위함이다. 뒷채움재의 규격이 크고 입도가 불량한 것은 일반교량에 비해서 배수를 원활히 하기 위함으로 교대 뒷면 뒷채움 하부에 그림 2에서와 같이 유공관을 설치한 것도 뒷채움재의 공극을 채우는 수압에 의한 토압의 증가를 막기 위함이다.

일반적으로 뒷채움재료를 포설할 때는 편토압이 작용하지 않도록 구조물의 양면이 동시에 같은 높이가 되도록 하여야 한다. 특히 무조인트교량의 경우는 양측 교대의 상면에 주형을 거치해야 하므로 구조물 뒷채움시 변위가 발생하지 않도록 뒷채움재료를 양측 교대에서 동시에 포설하는 것이 중요하다.

3.5 교각부의 SHEAR KEY

기본개념에서 설명한 것과 같이 일체식교량에서 교각은 상부구조에 일체로 되어 있거나 독립되어있다. 본 교량의 설계에 있어서 교각은 일반조인트 교량과 같이 상부구조와 독립적으로 거동하는 것으로 한다. 일반적으로 조인트 교량에서는 교량의 횡방향 변위를 제어하기 위하여 교량 중앙부에 일방향 베어링이나 고정베어링을 설치한다. 이러한 일방향 고정베어링은 양방향 베어링보다 그 설치가 매우 복잡

하고 가격도 상대적으로 높다. 이러한 단점을 해소하기 위해 일체식 교량에서는 상부구조가 교대에 연결되어있는 것을 이용하여 교각지점에서 간단한 콘크리트 블록을 이용하여 이러한 횡방향 변위를 제어할 뿐만 아니라 지진 시에 상부거더(P.C BEAM)의 탈락을 방지하는 두가지 역할을 수행한다(그림 6). SHEAR KEY를 설치함에 따라 무조인트 교량에서는 일반조인트교량에서 사용하는 고정슈나 일방향 슈를 사용할 필요가 없게 되고, 설치비가 싸고 설치가 용이한 양방향 슈만을 사용할 수 있다.

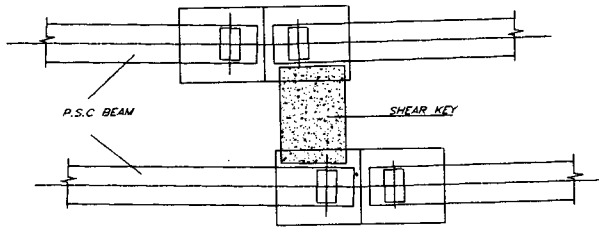


그림 6. SHEAR KEY 배치도

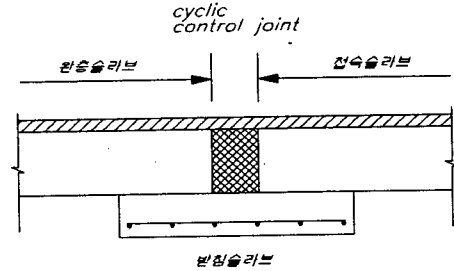


그림 7. Cyclic Control Joint 개념도

3.6 CYCLIC CONTROL JOINT

일체식교대 교량에서 중요한 특징중의 하나는 온도에 의한 변위를 교대와 뒷채움, 파일의 유연성을 이용하여 흡수한다는 개념이다. 또한 나머지 잔류변위는 접속슬라브를 통하여 접속슬라브 끝단에 있는 Cyclic control joint에 의해서 해소된다. 접속슬라브를 통하여 변위를 잘 전달하기 위해 접속슬라브와 보조기층사이에는 P.E막을 설치하여 접속슬라브와 보조기층사이의 마찰력을 최소로 한다. 본 설계에서는 국내 4차선 이상의 도로교에 일반적으로 사용되는 접속슬라브와 완충슬라브를 그대로 적용하여 교량부에서 발생한 응력을 해소하도록 하였다. 교량부에서 발생한 응력으로 인한 변위는 접속슬라브와 완충슬라브 사이에 약 30cm 정도의 간격을 두고(그림 7) 그 사이를 일반 아스팔트콘크리트로 채우도록 하였다. 접속슬라브의 변위 발생시 이동을 용이하도록 콘크리트로 반침슬라브를 타설하도록 하였다.

4. 결론 및 향후연구과제

국내에서 시험시공 중에 있는 무조인트교량은 국내에서 일반적으로 사용되는 도로교의 특성을 최대한 반영하여 설계하였다. 본 설계에 적용된 일반적인 특성은 ① 교대말뚝의 기초로 교량 상부구조의 온도 변화에 의한 신축변위를 흡수하기 위하여 유연성이 뛰어난 H-말뚝을 교대에 일렬로 배치하고, ② 상부구조와 교대의 일체화를 위하여 1차로 하부교대의 콘크리트를 타설하고, 그 상단에 탄성고무판을 놓고 빔을 거치한후 2차로 주형을 매설하여 상부교대 콘크리트를 타설하였으며, ③ 교량부의 응력이 도로부에 전달되는 것을 최소화하기 위하여 기존의 접속슬라브와 완충슬라브를 그대로 적용하며, ④ 온도변화에 따른 교량부의 변위를 흡수하기 위하여 완충슬라브와 접속슬라브의 사이에 cyclic control joint를 설치하며, ⑤ 교각부에는 일방향 가동 베어링보다 경제적이고 시공성이 양호한 양방향 베어링을 사용하고 교축 직각방향에 발생 가능한 내진 수평력 및 온도신축으로 인한 횡방향 변위를 고정하기 위하여 교각 코핑(coping) 상면에 철근을 배근하여 전단블럭을 설치한다.

시험시공과 관련하여 무조인트교량의 거동을 분석하기 위하여 계측이 예정되어 있으며 교량 공용 후에도 지속적인 관찰과 계측이 이루어질 계획이다.

참고문헌

1. Alan A. Soltani and Anant R. Kukreti, "Performance Evaluation of Integral Abutment Bridges", TRR 1371, pp 17-25.
2. Burke, Martin P., "Bridge Approach Pavements, Integral Bridges, and Cycle-Control Joints", TRR 1133, pp 54-65.
3. Burke, Martin P., "Bridge Approach Pavements, Integral Bridges and Cycle Control Joints", TRB's 66th Annual Meeting, pp 1-37, 1987.
4. Burke, M. P.(1989), Jr., "Bridge Deck Joint," NCHRP Synthesis of Highway Practice 141, TRB, National Research Council, Washington D.C.
5. Burke, M.P., Jr.(1993), "Integral Bridge: Attributes and Limitations," TRR 1393
6. Charles W. Roeder and Shashi Moorthy, "Thermal Movements in Bridges", TRR1290, pp 135-151.
7. Griemann, L. F., Wolde-Tinsae, A.M.(1988), "Design Model for Piles in Jointless Bridge," J. Struct. Engrg., ASCE, Vol. 114, No 6, June
8. James L. Jorgenson, "Behavior of Abutment Piles in an Integral Abutment in Response to Bridge Movements", TRR 903, pp 72-79.