철도교량 단부 회전에 따른 콘크리트 궤도의 변형특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Characteristics of Deformation for Concrete Track on Railway Bridge Deck End induced by Bridge End Rotation

임종일 · 송선옥* · 최정열 · 박용걸

Jongil Lim · Sunok Song · Jungyoul Choi · Yonggul Park

Abstract In this study, by considering the rail fastening support distance and the distance between the bridge and the abutment, the behavior of concrete track installed on a railway bridge end deck and the bridge end rotation were analyzed. In order to analyze the track-bridge interaction, bridge and abutment specimens with concrete track structures were designed and used in laboratory testing. At a constant fastening support distance, an increase in the bridge end rotation caused an increase in the displacement of the rail. Therefore, the displacement of the rail directly affects the rail and clip stress. Further, it is inferred that the results of multiple regression analysis obtained using measured data such as angle of bridge end rotation and fastening support distance can be used to predict the track-bridge interaction forces acting on concrete track installed on railway bridge deck ends.

Keywords : Concrete track, Railway bridge deck end, Track-bridge interaction, Bridge end rotation, Uplift force

초 록 본 연구에서는 교량 단부의 레일지지점 간격, 교량과 교대사이 거리(유간) 및 교량 단부 회전각을 고려하여 콘크리트 궤도가 부설된 교량 단부 궤도의 거동을 분석하였다. 궤도구조가 고려된 교량 및 교대 시험체를 이용한 실내시험 결과, 동일한 유간(레일지지점 간격)에서 교량 단부 회전각이 증가함에 따라 레일의 변위가 선형적으로 비례하는 것으로 나타났다. 또한 이러한 레일의 변위는 레일 및 체결구의 발생응력에 직접적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 실험결과를 바탕으로 다중 회귀분석을 수행하여 레일지지점 간격 및 교량의 단부 회전각을 매개변수로 하는 철도교량 단부 궤도의 궤도-교량 상호작용력 예측식을 도출하였다.

주요어 : 콘크리트궤도, 철도교량 단부, 궤도-교량 상호작용, 교량 단부 회전, 상향력

1. 서 론

국내외에서 궤도 유지관리비용 저감 및 안정적인 승차감 확보를 위해 콘크리트궤도 부설이 늘어나고 있으며 철도교량은 장대화 되고 있는 추세이다. 일반적인 자갈도상궤도는 교량상판과 궤도(레일 및 침목) 사이에 도상 자갈이 위치하여 구조적으로 교량구조와 궤도구조는 분리되어있다. 하지만, 콘크리트궤도는 교량상판에 궤도 콘크리트층(TCL)이 탄성분리재에 의해 구조적으로는 분리되어 있으나 상대적으로 중량과 강성이 큰 궤도 콘크리트층은 교량의 거동에 종속적으로 거동하며 교량 상부구조는 궤도 콘크리트층의 궤도지지층으로써 궤도 콘크리트층의 변위를 전달받고 하중을 분산시키며 궤도 콘크리트층 자체의 하중부담을 경감시켜주는 구조적인 역할을 수행하게 된다[1-3,7]. 따라서 궤도 콘크리

트층에 고정된 레일 및 레일지지점은 교량구조의 거동에 직접적인 영향을 받는 구조적인 특징을 가지고 있다[1].

또한 콘크리트궤도가 부설된 교량 단부에서는 열차하중에 의한 단부 회전각 발생, 교량기초의 침하 및 교량 상판의 상·하연 온도차 등에 의해 교량 상판이 정, 동적으로 거동하게 되어 단부 궤도가 변형되고, 이러한 궤도의 변형은 궤도 구성품(레일 및 레일체결장치)에 직접적인 상호 작용력으로 작용하게 된다[1,7]. 이에 콘크리트궤도가 부설된 교량 단부 사용성을 확보하는 측면에서 궤도-교량의 상호작용에 대한 현상을 이해하는 것이 필요하다.

철도교량 단부 궤도의 상호 작용력에 대한 기존의 국내 연구결과는 교량 단부에 작용하는 상호작용력의 영향 인자로 교량의 기하학적 특성(교량받침~도목신축이음매간 거리, 교량받침~레일 체결장치간 상대위치)과 교량의 최대 처짐량을 비롯하여 레일체결장치의 스프링 강성 등에 대한 매개변수 연구가 수행된 바 있다[9-11].

이러한 수치해석적인 방법은 교량 및 궤도 설계 측면에서는 유용할 수 있으나, 이러한 설계과정에 적용하는 분석절차를 이용하여 공용중인 교량의 궤도-교량 상호작용력 특성

*Corresponding author.

Tel.: +82-31-8005-7100, E-mail : happy@hyundai-dvp.com

©The Korean Society for Railway 2013

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.3.217>

을 평가하기에는 여러 가지 제약요인이 있다. 실제 교량에서 발생하는 교각의 부등침하 및 교각의 회전(휨)은 공용상태에서 열차하중에 의한 변형이라기보다는 환경 및 노반조건에 영향을 받아 발생하는 장·단기 변형특성으로써 주행시험을 통한 측정으로 이러한 교량 하부구조물의 변형이 단부 궤도에 미치는 영향수준을 추출해 내기에는 현실적으로 매우 어렵다. 하지만 이러한 교각의 침하 및 기타요인으로 인한 단부 궤도의 단차는 단부 궤도에 매우 큰 영향을 미칠 수 있다.

또한 교량 단부의 궤도구성품은 일반적인 토목구조물의 시공오차 보다 매우 미소한 수준의 변형에도 심각한 손상 및 장기내구성에 직접적인 영향을 받을 수 있으며, 현장시공 과정에서 발생하는 단부 궤도의 단차를 비롯하여 공용기간 중 발생 가능한 레일패드(탄성패드)의 열화에 따른 경화, 두께감소 등에 따라 단부 궤도의 변형특성은 영향을 받게 될 수 있다. 따라서 이러한 다양한 현장요인들에 의해 공용중인 교량 단부에서 단부 회전의 수준이 설계수준에서 안정적으로 거동을 하더라도 단부 궤도가 받는 궤도-교량의 상호 작용력은 과도한 상태일 수 있으며, 이에 따른 궤도구성품의 파괴가 발생할 수도 있다. 따라서 교량의 상부구조물의 거동뿐만 아니라 궤도의 거동 역시 한계상태 분석기법을 이용하여 극한의 상태에서의 거동수준을 예측하고 평가함으로써 공용 중 발생 가능한 궤도 안전성 저해요인을 사전에 분석하는 연구가 필요하다.

이에 본 연구에서는 공용중인 철도교량의 단부 회전의 수준을 국내외 철도교량 설계기준을 상회하는 조건으로 실험을 수행하였다. 또한 궤도-교량 상호 작용력의 수준을 극대화하기 위해 교량 유간(레일지지점 간격) 및 교량 처짐(단부 회전각)과 같은 단부 궤도와 교량상판의 수직방향 변형(vertical tolerance between track and bridge deck)에 직접적으로 큰 영향을 미치는 매개변수를 시험에 적용하여 교량의 단부 회전에 의한 궤도-교량 상호작용력의 발생경향 및 수준을 실험적으로 입증하였다.

2. 본 론

2.1 궤도-교량 상호작용

궤도-교량 상호작용(track bridge interaction, TBI)은 국내외 철도교 설계기준에 명시된 주요 설계검토 항목이다. 철도교량의 거동수준은 열차운행안전 및 승차감 측면에서 궤도와 상호작용력의 수준을 파악하여 결정되어야 한다[9,11,14,15]. 철도교량의 온도하중 영향에 따른 거동을 비롯하여 상부구조의 휨에 기인한 종방향 변형과 수직방향 변형의 수준은 교량상 궤도구조의 거동에 직접적인 영향을 미치며 추가적인 상호작용력을 발생시키는 요인이 된다[9,11,14-18].

이러한 궤도-교량 상호작용력 중 온도 및 시계동 하중, 열차하중에 따른 궤도-교량의 종방향 상호작용력은 대부분 장대레일 축력안정성(장대레일 좌굴안정성)과 밀접한 관련이 있으며, 이와 관련된 다양한 연구가 국내외에서 진행된 바

있다[11,14,19-23]. 교량 상부구조의 처짐 및 변형으로 인해 일반적인 토공구간과 달리 교량상 레일은 종방향으로 변위가 발생하며, 이 종방향 발생 변위량은 교량상부구조의 형식(재료), 형고, 단면강성 및 경간장과 같은 구조물적인 측면과 온도하중 및 열차하중에 의한 교량의 거동에 직접적인 영향을 받게 된다[14-16]. 이러한 교량구조물의 종방향 변위는 레일 체결장치, 침목 및 도상에 의해 억제되어 있기 때문에 궤도와 교량의 종방향 변위 및 신축량 차이에 상응하는 에너지가 레일단면에 응력으로 축적되어 레일에 추가적인 축력(additional axial force on rails)으로 작용한다. 종방향 부재의 길이와 종방향 저항력에 비례하여 증가하는 부가 축응력은 장대레일로 부설된 콘크리트궤도에서 더욱 증가하게 되며 이러한 장대레일 부가 축응력의 증가를 방지하고 궤도-교량 종방향 상호작용력을 해소하기 위한 기술적 대안이 궤도 및 교량차원에서 다양하게 제시된 바 있다[14,15,19-23].

또한 교량상부구조의 처짐 및 단부 회전과 같은 수직방향 변형에 의해서도 궤도-교량의 종방향 상호작용력이 발생한다. 처짐에 따른 교량상판의 변형은 수직방향의 변형뿐만 아니라 종방향으로의 변형을 초래하며 이러한 종방향 변형수준은 교량상부구조의 기하학적 특성(경간장, 형고)에 직접적인 영향을 받으며, 대부분 교량 받침에서 수용 가능한 수준의 변형이 발생되도록 교량단면 및 구조형식을 설계하여야 한다[14-18]. 이러한 종방향 상호작용력 외에도 교량의 수직방향 거동에 따른 궤도-교량 상호작용의 구조적 문제는 대부분 토공구간과 교량 연결부(교대부) 또는 교량 연결부(교각부)와 같은 교량의 단부에서 발생한다[1-4]. 자갈궤도가 부설된 교량의 경우 교량 상판과 레일 및 침목을 포함하는 레일지지점 사이는 도상자갈에 의해 구조적으로 분리되어 교량 상판의 거동이 궤도의 변형에 직접적으로 영향을 미치지 않는 못하였다.

하지만 콘크리트궤도가 부설된 교량의 경우에는 Fig. 1과 같이 교량 상판에 고정되어 있는 콘크리트궤도의 레일과 레일지지점은 교량 단부의 회전에 의한 교량의 변형에 궤도가 종속적으로 함께 변형하게 되고, 이러한 변형곡선(곡률, curvature)은 궤도구성품에 직접적인 상호 작용력으로 작용하게 된다[1,3-5,7]. 이러한 교량 단부의 회전에 따른 레일의 변형과정에서 교량측 마지막 레일지지점은 압축력이, 교대측 첫 번째 레일지지점에는 상향력이 발생하게 된다[1,2,5,7].

Fig. 1과 같이 교량 상판의 변형(단차 및 회전)에 의해 궤

Fig. 1 Deformed shape (curvature) of the rail and bridge deck due to end rotation

도(레일)의 변형이 발생하고 이러한 작용력은 직접적으로 레일체결장치에 전달된다. 이러한 단부 궤도에 작용하는 궤도-교량 상호 작용력은 교량의 구조적인 측면에서 불가피한 교량의 변형특성에서 기인한다[14,15].

따라서 이러한 철도교량 단부에서 콘크리트궤도의 사용성을 보장하기 위해서는 교량 단부 회전 및 단차로 인해 레일 지지점의 체결장치에 발생하는 상호작용력(상향력 및 압축력)이 레일체결장치의 레일패드(탄성패드) 및 체결구에서 공용기간 동안 아무런 손상 없이 충분히 흡수할 수 있어야 한다[1,2,5,7]. 또한 일정수준의 교량 단부 변형은 궤도의 레일지지점에서 수용할 수 있어야 하며, 이에 독일 DS804-App29에서는 단부에 사용되는 레일체결장치의 요구성능 수준을 명시하고 특수 체결장치(DB AG and BWG, elastic ribbed plate support, ERL)를 이용한 단부 궤도의 상호작용력 저감방안을 제시하였으며, 단부 레일지지점에 작용하는 상향력과 압축력의 한계수준을 레일체결장치의 성능과 연계하여 제시하고 이를 만족시킬 수 있는 교량 및 궤도설계를 권고하고 있다[1-3,5,7]. 체결구에 작용하는 상향력의 허용치는 레일체결장치의 초기 체결력(F_0 , pre-load) 이내로 규정하였다[1,7]. 즉 상향력의 경우 초기 체결력을 초과하는 하중이 레일지지점에 작용하게 되면 레일 하부의 패드에는 아무런 pre-load가 작용하지 않게 되므로 패드가 자유롭게 움직일 수 있는 상태가 되며, 패드가 밖으로 밀려나 체결장치에 추가적인 손상이 발생할 수 있다. 또한, 압축력에 대한 허용치는 탄성패드의 변형한계를 초과하지 않는 수준으로 규정하고 있다[1,7].

2.2 실내시험

본 연구의 실내시험에서는 교량의 단부 회전에 따른 교량 상판의 수직방향 변형 특성이 콘크리트궤도가 부설된 교량 단부 궤도의 거동에 미치는 영향에 대한 매개변수 실험을 수행하였다. 또한 단부 궤도의 거동수준을 극대화하기 위해 국내외 철도교 설계기준치 이상의 단부 회전각을 발생시키고자 시험하중(prescribed loading)을 선정하고, 콘크리트궤도가 부설된 교량 및 교대 시험체를 제작하여 철도교량 단부의 형상을 실험적으로 모사하였으며, 이를 통해 교량 단부 회전에 따른 교량 단부 궤도의 상호작용력(레일상향변위, 체결구 및 레일저부응력)을 실험적으로 분석하였다. 시험체의 제원과 단면도는 각각 Table 1 및 Fig. 2와 같다[13].

Fig. 2(a)와 같이 시험하중에 의해 교량 시험체의 자체적인 휨변형이 발생되지 않도록 충분한 강성을 갖는 강합성 구조로 교량 시험체를 설계 및 제작하였다. 교대 시험체 역시 레일체결장치를 견고히 고정할 수 있고 자체적인 변형이 발생되지 않도록 Fig. 2(b)와 같이 충분한 중량을 갖는 라멘형식의 콘크리트 구조로 제작되었다.

본 실험에 사용된 교량 시험체의 형고는 750mm로써 실제 교량의 형고 보다 매우 작다. 철도교량 단부 궤도에 작용하는 궤도-교량 상호작용 중 단부 회전에 의해 발생하는 교량 및 궤도의 종방향 변형(longitudinal deformation)은 교량 상부구조의 형고(bridge depth)에 직접적인 영향을 받으며

Table 1 Properties of specimens

Specimen	Value
Bridge	Length : 3.4m, Width : 2.8m
Abutment	Length : 2.8m, Width : 2.8m
Track type	Direct fixation concrete track system
Rail	UIC60
Rail fastening system	Pandrol SFC 1501 (Single fast clip) Static spring stiffness : 48kN/mm, Thickness : 10mm

Fig. 2 Cross-section of test specimens (unit : mm)

며 형고의 사이즈에 비례하여 증가한다. 따라서 본 실험에서 검토한 단부 회전각과 동일한 조건이라면 실제 교량에서의 단부 회전에 따른 종방향 상호 작용력의 발생수준은 본 실험에서의 결과보다 클 것이다. 하지만 본 연구에서 검토하고자 하는 궤도-교량 상호 작용력은 단부 회전에 따른 교량 상판의 수직방향 변형(vertical deformation)이며, 이러한 수직방향 상판변형 수준(vertical tolerance of deck)은 형고에 직접적인 영향을 받지 않는다. 따라서 본 연구에서는 종방향 변형에 따른 효과를 최소화 하고자 교량 시험체의 형고를 작게 하였으며 별도의 지그를 사용하여 레일 및 교량, 교대 시험체의 종방향 변위를 최대한 구속하였다.

Fig. 3은 유간(레일지지점 간격)에 따른 시험체 설치 개요도 및 전경을 나타낸다. 실내시험에서 고려한 단부 유간의 거리는 경부고속철도 2단계 구간(대구-부산간) 교량상 TCL 단부 침목의 이격거리(단부 유간) 조사결과를 바탕으로 선정하였다. 경부고속철도 2단계 구간 실시설계보고서를 바탕으로 교량 단부 유간을 조사한 결과, TCL span에 따라 670~845mm까지 설계 및 시공에 반영된 것으로 조사되었다[24]. 따라서 교량 및 교대 시험체의 배치는 단부 궤도에 발생하는 상호 작용력을 극대화하기 위하여 교량 단부의 유간을 300, 600, 900mm(교량측 마지막 레일지지점과 교대측 첫

(d) Overview of test specimen and instrumentation

Fig. 3 Measurement setting for the experiment (unit : mm)

번째 레일지지점의 간격 700, 1,000, 1300mm)로 시험체를 세팅하고 시험케이스를 각각 Case 1~3으로 구분하였다.

또한 Fig. 3과 같이 Actuator 가력지점부터 교대부 마지막 레일지지점까지 충분한 길이로 구성하여 교량 단부 회전에 따른 레일 변형의 영향범위를 파악할 수 있었으며 경계조건 효과의 영향을 최소화 할 수 있었다.

본 시험에 적용된 교량 시험체는 Fig. 3과 같이 교량 지지점부의 회전 자유도만을 허용하는 핀 지지(pin support)된 캔틸레버 구조로써 자유단의 처짐에 의해 단부의 회전을 효과적으로 유발시키고 이에 따라 단부 궤도에 상향력 및 압축력을 추가시키는 가력지점으로써의 역할을 할 수 있도록 시험체를 설계하였다. 이러한 교량 시험체를 이용하여 교량의 처짐 및 단부 회전에 따른 변형(곡률)을 궤도의 변형(곡률)으로 유도하여 단부 궤도에 궤도-교량 상호 작용력을 추가시키고자 하였다.

또한 교량의 자유단에 고정된 Actuator에 의해 제어되는 회전각은 충분한 강성의 교량 시험체에 의해 약 3~4m 이상 떨어진 교량 단부 궤도 및 교대부 궤도에 하중의 손실 없이 전달되어야 한다. 이를 위해 보다 정확한 변위제어가 가능하도록 Fig. 4와 같이 교량 시험체와 Actuator가 강체(rigid body) 거동을 할 수 있도록 가력 지점부를 설계하였으며 이로써 Actuator 변위제어를 통한 교량의 단부 회전각 조정을 정교하게 할 수 있었다. 또한 Fig. 4(b)와 같이 가력 지점부 하면에 변위계를 설치하여 Actuator의 시험하중(prescribed

(a) Top view

(b) Bottom view

Fig. 4 Overview of actuator support

loading, displacement)에 대한 보정을 통해 정확한 변위제어가 가능하도록 하였다.

또한 교량의 단부 회전에 의해 발생하는 단부 궤도의 상호 작용력을 보다 뚜렷하게 파악하기 위해 단부 회전의 수준을 가급적 크게 유도하고자 일본 및 유로코드의 설계기준치를 초과할 수 있는 수준으로 다양한 단부 회전각의 수준을 설정하였다[14-18]. 국내 철도교량 단부 회전각의 기준은 0.0005 rad로써 일본 및 유로코드 대비 약 10배 이상 작게 설정되어 있으며, 국외기준 대비 상대적으로 철도교량의 거동한계에 여유치가 없는 것으로 분석되었다[8,11]. 따라서 국내 단부 회전각 허용기준은 실험적으로 철도교량의 단부 회전에 따른 단부 궤도에 발생하는 궤도-교량 상호작용력의 수준을 파악하기에는 다소 작은 수준이므로 본 연구에서는 고려하지 않았다. 교량 시험체의 변위는 최대 25mm까지

Table 2 Angle of bridge end rotation controlled by prescribed loading

Test condition		Reference Code	
Prescribed loading (displacement)	Bridge end rotation	Country (Track type)	Bridge end rotation
5mm	0.0019 radians	Japan (360km/h)	0.002 radians
10mm	0.0037 radians	-	-
15mm	0.0056 radians	UIC (Slab track on one side)	0.005 radians
20mm	0.0074 radians	-	-
25mm	0.0093 radians	UIC (Ballasted track on both side)	0.010 radians

5mm 단위로 증가시켜 가며 단계별 정적 변위제어를 실시하였으며, Table 2는 단계별 정적 변위제어에 따른 교량 시험체의 단부 회전각 발생량을 국외 철도교량 단부 회전각 허용 기준과 비교하여 나타낸 것이다.

교량 시험체의 길이(가력지점부터 핀 지지받침까지의 거리) 및 자유단의 처짐량(변위제어 수준)을 고려하여 교량 시험체에 발생하게 될 단부 회전각의 수준을 사전에 계산하고, Fig. 6(b)와 같이 측정을 통해 검증하여 Table 2에 나타내었다. Table 2와 같이 교량 시험체의 변위 5mm는 교량 단부에 약 0.002 rad 만큼의 단부 회전각을 유발시키며, 이는 일본 고속선 철도교량의 단부 회전각 허용기준과 유사한 수준을 모사하고자 하였다.

또한 UIC에서 제시하는 콘크리트궤도가 부설된 철도교량 단부 회전각 기준을 초과하는 수준의 시험하중(0.0056 rad)을 고려하였으며, 마찬가지로 UIC의 자갈궤도 부설교량의 단부 회전각 기준을 최대 시험하중(0.0093 rad)으로 산정하여 시험에 적용하였다[14-18].

Case별 센서설치 위치는 동일하며 센서설치 개요도는 Fig. 5와 같다. 교량 단부 회전에 기인한 레일의 변형수준을 정량적으로 파악하기 위해 레일의 변위측정 시 교량 및 교대 시험체의 거동에 변위계(displacement transducer, LVDT)가 간섭 받지 않도록 별도의 프레임(Fig. 5 및 Fig. 6(a) 참조)을 설치하여 Case별 레일변위를 측정하였다.

또한, Fig. 6(a)와 같이 체결구 및 레일저부에 Strain gage를 설치하여 체결구 및 레일저부의 발생 응력을 측정하였으며, 변위제어에 따른 단부 회전각의 발생 수준을 파악하기 위해 Fig. 6(b)와 같이 교량 시험체 지점부의 상대 변위측정을 통해 단부 회전각을 산출하였다.

2.3 실험 결과 및 분석

2.3.1 레일변위

Fig. 7과 같이 레일변위는 교량 시험체의 받침 직상부(R3)를 기준으로 교량측 레일(R1, R2)에서는 하향변위가 발생하였으며, 교량 마지막 레일 지지점(R4)부터 교대 직상부 레일(R4~R9)까지 상향변위가 발생하여 전형적인 교량 단부 레일의 변형곡선 특성이 나타났다. 교량 단부 회전각의 증가에 따라 레일의 상향변위 또한 선형적으로 비례하여 증가하는 것으로 나타났으며, 최대 단부 회전각 발생 시(25mm, 0.01 rad) 최대 레일상향변위는 R4~R5위치에서 약 2mm로 나타났다.

Fig. 5 Illustrations of sensors instrumentation

(a) Sensors for track response (vertical rail displacement, rail stress and clip stress)

(b) Displacement transducer (LVDT) for bridge end rotation

Fig. 6 Photograph of sensor instrumentation

2.3.2 레일저부응력

Fig. 8과 같이 레일저부응력은 예상대로 교량과 교대 사이(S4-S5)에서 최대 압축응력이 발생하였으며, 교대부에서는 인장응력이 발생하였다. 또한 교대부 레일에 발생한 인장응력은 교대부 마지막 레일지지점에서 거의 0으로 수렴하여 레일상향변위 측정결과와 일치하는 경향이 나타났다. 또한 교량측 마지막 레일지지점과 교대부 첫 번째 레일지지점의 거리가 증가함에 따라 레일저부응력은 다소 증가하는 경향을 나타내었으나 그 수준은 뚜렷하지 않았다. Fig. 7 및 Fig. 8과 같이 레일의 응력은 레일의 곡률과 직접적인 관계가 있으며, 따라서 교량 단부의 레일에 발생한 상향 변형곡률(upward curvature)로 인해 교량과 교대부 사이의 레일 저부에는 압축응력이 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 교량 단부 회전각의 증가에 따라 레일저부응력 역시 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 레일저부응력과 단부 회전각 사이의 선형관계는 보의 휨응력은 곡률과 회전각에 선형적으로 비례하여 증가하는 Euler-Bernoulli beam equation으로 입증 가능하며, 따라서 본 실험에 적용된 궤도-교량 시험체의 조합(교대 포함)에서 교량 시험체의 단부 회전각은 교량 단부 레일의 발생 곡률에 적절히 반영된 것으로 분석되었다.

2.3.3 체결구 응력

체결구 응력 측정결과, Fig. 9와 같이 교량 받침 직상부

(C3)의 경우 교량과 체결구의 회전축 일치로 단부 회전에 따른 궤도-교량 상호 작용력이 발생하지 않아 발생응력의 수준이 매우 미소하게 나타났다. Fig. 9와 같이 교량측 마지막 레일 지지점(C4)과 교대부 레일지지점(C5, C6)에서 최대 체결구 응력(인장)이 발생하였음을 확인할 수 있으며, 이는 해당위치의 레일이 부상했음을 의미한다. 본 실험에 적용한 체결구의 경우, 체결구를 조립함과 동시에 소정의 체결력이 도입되며 이때 체결클립에 도입되는 응력은 압축응력을 나타낸다[1,12,13].

따라서 교량의 단부 회전에 의해 단부 레일 및 레일지지점에는 상향변위가 발생하게 되고 이러한 교량과 레일의 변형특성에 기인하여 Fig. 9와 같이 교대부 체결구에는 초기 응력상태와 반대되는 인장응력이 발생하는 것으로 나타났다.

레일지지점 간격과 단부 회전각의 변화에 따른 측정 최대치를 측정항목별로 구분하여 Fig. 10에 나타내었다.

또한 각각의 매개변수에 대한 측정결과를 바탕으로 레일 지지점 간격과 단부 회전각에 따른 단부 궤도-교량 상호 작용력(레일의 상향변위, 레일저부응력 및 체결구의 발생응력)의 관계를 분석하기 위한 중회귀 분석(multi-regression analysis)을 수행하였으며, 그 결과는 Table 3과 같다. 실내 시험 결과를 바탕으로 수행한 중회귀분석 결과, Table 3과 같이 회귀식의 상관계수(R^2)가 모두 1에 가깝게 나타나 회귀식의 신뢰성은 양호한 것으로 분석되었으며, 레일 상향 변위 및 레일저부응력과 체결구 응력에 미치는 레일지지점

Fig. 7 Measured vertical rail displacement along bridge and abutment

Fig. 8 Measured rail stress along bridge and abutment

Fig. 9 Measured clip stress along bridge and abutment

Fig. 10 Rotation angle and track-bridge interaction for different rail fastening distances between bridge and abutment

Table 3 Results of multiple regression analysis performed using measured data

Track bridge interaction	Prediction equation	Coefficient of determination (R^2)	Standard error of estimate
Rail displacement (mm)	$0.001L_s + 227.167\phi - 1.809$	0.937	0.212
Rail stress (MPa)	$0.009L_s + 5,580.046\phi - 7.1$	0.984	2.273
Clip stress (MPa)	$0.107L_s + 17,013.333\phi - 135.733$	0.932	16.484

L_s : Rail support distance between bridge and abutment (mm), ϕ : End rotation (rad)

간격과 단부 회전각의 상관관계를 잘 설명하는 것으로 나타났다.

교량 단부 레일의 상향변위는 Fig. 10(a) 및 Table 3과 같이 교량의 단부 회전각과 레일지지점 간격에 비례하여 증가하는 것으로 나타났으며, 레일지지점 간격이 약 300mm 증가함에 따라 레일의 상향변위는 약 2배 이상 증가하는 것으로 나타났다. 또한 레일의 상향변위와 단부 회전각 사이에는 Fig. 10(a)와 같이 다소 비선형적인 관계를 나타내었으며 이는 보(Beam)의 변위와 회전각 사이의 비선형 특성을 설명하는 Euler-Bernoulli beam equation의 관계에서 기인한 것으로 분석되었다. 또한 레일의 상향변위는 레일지지점 체결구의 발생응력에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났으며, Fig. 10(a)의 “레일 상향변위 단부 회전각(uplift displacement-rotation angle)”의 관계와 Fig. 10(c)의 “체결구 응력-단부 회전각(clip stress-rotation angle)”의 관계가 매우 유사한 특성을 나타내었다. 반면 레일의 발생응력은 Fig. 10(b)

와 같이 레일지지점 간격에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며, 발생응력의 패턴 역시 레일의 상향변위와 체결구 응력과 다소 상이하게 나타났다.

실내시험 및 중회귀 분석 결과, 교량의 단부 회전에 따른 교량 상부구조의 변형(곡률)은 레일의 변형을 유발하였으며 교량의 곡률이 궤도에 직접적으로 전달되었음을 실험적으로 입증하였다.

Fig. 11은 교량 마지막 레일지지점과 교대측 첫 번째 레일지지점의 간격이 700mm일 경우의 회귀식을 적용하여 실험결과와 비교한 결과를 나타낸다. Fig. 11과 같이 레일지지점 간격을 동일하게 정의한 궤도-교량 상호작용력 회귀식이 신뢰구간 99%범위 내에서 레일의 상향변위, 레일저부응력 및 체결구 응력 측정결과와 매우 잘 일치하였으며, 다소 비선형적인 특성이 나타난 단부 회전각 대비 레일의 상향변위와 체결구의 발생응력 역시 신뢰구간 99% 범위 내에서 단부 회전각에 선형 비례관계인 것으로 분석되었다.

Fig. 11 Measured track-bridge interaction and values predicted by multiple regression analysis at confidence intervals of 99%

3. 결 론

본 연구에서는 콘크리트레도가 부설된 교량 단부 레도의 거동 분석을 위해 레도구조가 적용된 교량 및 교대 시험체를 제작하여 실내시험을 수행하였다. 교량과 교대 사이의 유간에 변화를 주어 단부의 레일지지점 간격을 시험변수로 설정하였다. 또한 핀 지지된 캔틸레버 시험체를 이용하여 교량 중앙부 처짐에 따른 단부회전각을 시험하중으로 적용하고 국내외 설계기준을 초과하는 수준의 단부회전각에서 단부 레도의 거동을 분석하였다.

레일변위는 교량 시험체의 받침 직상부를 기준으로 교량 측 레일에서는 하향변위가 발생하였으며, 교량 마지막 레일 지지점부터 교대 직상부 레일까지 상향변위가 발생하여 전형적인 교량 단부 레일의 변형곡선 특성이 나타났으며, 이러한 레일의 변형특성은 레일과 이를 지지하는 체결구의 발생응력에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 교량 단부 회전각의 증가에 따라 레일의 상향변위 또한 선형적으로 비례하여 증가하는 것으로 나타났으며, 최대 단부 회전각 발생 시(0.01 rad) 최대 레일상향변위는 교량측 마지막 레일 지지점에서 약 2mm로 나타났다.

연구결과 교량의 단부회전각과 단부 레도의 레일지지점 간격은 단부 레도 구성품에 작용하는 상호작용력에 직접적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 특히 교량 단부 회전에 의한 레일의 상향 변형곡률은 레일지지점(체결구)에 직접적인 하중으로 작용하여 정상 체결상태의 응력수준 보다 큰 부가응력을 유발시킴으로써 단부 체결구의 내구성능 및 피로 수명 저하에 직접적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 또한 동일한 수준의 교량 단부 회전이 발생하더라도 레일지지점의 간격 확대는 레일의 상향변위와 체결구의 응력 증가에 직접적인 영향을 미치므로 운행선 철도교량 단부 레도의 레일지지점 간격 확대 방지를 위한 방안이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국토해양부 한국건설교통기술평가원 미래철도 기술개발사업의 연구비지원(과제번호: 11PRTD-C060294-01-

000000, 과제명 : 콘크리트레도가 부설된 철도교량상 장대 레일 축력저감 및 단부 사용성 확보를 위한 한국형 횡단케도시스템 개발)에 의해 수행되었으며, 관련자분들께 감사드립니다.

References

- [1] D.B. Deutsche Bahn, A.G. Netz (2008) Bridge deck Ends, Check for serviceability limit state of superstructure, DS804 – Appendix 29(German language).
- [2] D.B. Deutsche Bahn, A.G. Netz (2003) Richtlinie 804.5202 (German language).
- [3] Korea Rail Network Authority (2008) Research for improvement of concrete track interface performance.
- [4] Rudolf Seidel (2000) Feste Fahrbahn auf großen Stahlüberbauten der NBS Hannover-Berlin, EI-Eisenbahningenieur, 51, pp. 23-29 (German language).
- [5] D.B. Deutsche Bahn, A.G. Netz (1995) Anforderungskatalog zum Bau der Fahrbahn, 3. Überarbeitete Auflage, Stand, Catalogues for construction of slab track (German language).
- [6] Edgar Darr, Werner Fiebig (2006) Feste Fahrbahn, Konstruktion und Bauarten für Eisenbahn und Straßenbahn, ISBN 3-8266-1485-2, Eurail press (German language).
- [7] Korea Rail Network Authority, (2011) Railway design Standard (Track part).
- [8] Korea Rail Network Authority, (2011) Railway design Standard (Roadbed part).
- [9] J.Y. Choi, S.C. Yang, (2008) The Displacement Limit at the End of an Approach Slab for a Railway Bridge with Ballastless Track, *Journal of the Korean Society for Railway*, 11(2), pp. 195-202.
- [10] D.S. Chun, J.Y. Choi, H.Y. An, Y.G. Park (2008) Behavior of Fastening system of HSR bridge ends deck on slab Track installed Bridge, *Proceedings of the Korean Society for Railway Autumn Conference*, pp. 1624-1633.
- [11] H.K. Park, S.Y. Jang, S.C. Yang, Y.G. Park (2009) A Parametric Study on the Serviceability of Concrete Slab Track on Railway Bridge, *Journal of the Korean Society for Railway*, 12(1), pp. 95-103.
- [12] R.K. Min, D.Y. Sung, Y.G. Park (2012) Analysis of Dynamic

- Behavior of Railway Bridge with Concrete Track, *Journal of the Korean Society for Railway*, 15(2), pp. 147-153.
- [13] K.W Lee (2013) Applying transition track system to improve track performance in a railway bridge deck ends, Master's thesis, Seoul National University of Science & Technology.
- [14] International Union of Railway (UIC) Track Bridge Interaction.
- [15] International Union of Railway (UIC) Code776-3, Deformation of Bridge.
- [16] Eurocode (2003) Actions on Structure, Part 2, Traffic load on bridge, EN 1991-2.
- [17] Eurocode (2005) Basis of Structural Design, EN 1990:2001+A1.
- [18] International Union of Railway (UIC) (2008) Recommendations for Design & Calculation of ballastless track, ISBN2-7461-1397-X.
- [19] H.K. Jeon (2008) A Study on Sensitivity of Influencing Parameters on the Axial Force in CWR on a Viaduct, *Master's Thesis*, Seoul National University of Science & Technology.
- [20] K.S. Han (2002) The Parameter Study on the Characteristics of Axial Force in Bridge with Continuous Welded Rail, *Master's Thesis*, Seoul National University of Science & Technology.
- [21] H.J. Lee (1998) A Study of Longitudinal Force and Displacements in a Multi-Span Bridge Equipped with a CWR Track, *Master's Thesis*, Seoul National University of Science & Technology.
- [22] T.K. Kang (2003) A Study of How Train Load influences Axial Force in CWR on Bridges, *Master's Thesis*, Seoul National University of Science & Technology.
- [23] J.M. Kim (2006) A Study on the additional axial force generated by the Rotation of the support in the continuous welded Railway Bridge Girder, *Master's Thesis*, Seoul National University of Science & Technology.
- 접수일(2013년 3월 18일), 수정일(2013년 4월 14일),
게재확정일(2013년 5월 24일)
-
- Jongil Lim** : limji316@molit.go.kr
Graduate School of Railway, Seoul National University of Science & Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 139-743, Korea
- Sunok Song** : happy@hyundai-dvp.com
Graduate School of Railway, Seoul National University of Science & Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 139-743, Korea
- Jungyoul Choi** : cjypassion@hotmail.com
Dept. of Track and Railway Operations, Technische Universität Berlin (TU-Berlin), SG18, Salzufer 17-19, D-10587, Berlin, Germany
- Yonggul Park** : ygpark@seoultech.ac.kr
Graduate School of Railway, Seoul National University of Science & Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 139-743, Korea