궤도-교량 상호작용을 고려한 콘크리트 슬래브궤도 부설 교량의 단부 사용성 검토

Investigation of serviceability of bridge deck ends on concrete slab track-installed bridges considering track-bridge interaction

장승엽* 양신추** 김종태***

Jang, Seung Yup Yang, Sin Chu Kim, Jong-Tae

ABSTRACT

Deformations of bridge deck ends on abutments or on transition between bridge decks can cause extreme deformations on track. Especially, since slab track is fixed onto the bridge deck slab on concrete slab track-installed bridges, deformations of bridge deck ends directly affect the track behavior, and thus these interactions can bring about the premature failure of rail fastenings or other deteriorations to lower the serviceability. In this study, a foreign standard to evaluate forces on track components caused by the track-bridge interactions and the serviceability of bridge deck ends is investigated, and for the real bridges, the serviceability of bridge deck ends according to several parameters of bridge and track is analyzed. It is found that arrangements and spring coefficients of bridge bearings, as well as distance between bridge bearing and last rail support, support spacings, rail support spring coefficient, are very important parameters.

1. 서론

교대부나 교량 상부구조간의 연결부에서는 교량 상판 단부의 변형(단차 및 회전)에 의해 궤도에 과도한 변형이 발생하게 된다. 기존에 자갈궤도에 대해 제시되었던 교량의 단부꺾임각에 관한 기준은 교량의 단부 회전에 의한 자갈의 교란으로 인한 궤도틀림 발생과 이로 인한 주행안전 및 승차감의 저하, 빈번한 유지보수 발생 등의 문제를 고려하여 제시되었다. 반면 콘크리트 슬래브궤도가 부설된 교량에서는 자갈궤도와 달리 자갈 교란에 의한 궤도틀림 발생의 우려가 없기 때문에 이를 고려한 단부변형의 검토는 필요가 없지만 슬래브궤도의 경우 궤도가 교량 상판에 고정되어 있는 구조이므로 교량 단부의 변형이 궤도에 직접적인 힘을 가하게 되어 체결장치가 조기에 파손되는 등 교량 단부에서의 사용성의 악화를 가져올 가능성이 여전히 상존하고 있다 (그림 1 참조).

이와 관련하여 교량 변형으로 인해 궤도에 발생하는 부담력과 이에 따른 교량 단부의 사용성 검토에 관한 기준이 독일에서 제시된 바 있으며[1], 국내에서도 최근 경부고속철도와 호남고속철도를 비롯하여 콘크리트 슬래브궤도의 부설이 활발히 추진되고 있으므로 이와 관련한 정확한 기준의 도입이 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 국내 기준을 제시하기 위한 기초연구로써 교량의 변형으로 인해 궤도에 발생하는 부담력과 이에 따른 교량 단부의 사용성을 평가하는 국외 기준을 검토하고 이를 바탕으로 실제 교량을 대상으로 교량 및 궤도의 여러 가지 영향인자에 따른 교량 단부의 사용성을 분석하였다.

* 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부, 정회원

E-mail : syjang@krri.re.kr

Tel.: (031)460-5302, Fax: (031)460-5814

** 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부, 정회원

*** 한국철도시설공단, KR기술연구소, 정회원

2. 교량 변형에 의한 교량 단부에서의 사용성 검토를 위한 국외 기준 분석

앞서 서술한 바대로 교량 변형으로 인해 궤도에 발생하는 부담력과 이에 따른 교량 단부의 사용성 검토에 관한 기준으로 Eurocode (EN 1990-2002 [2])에서는 이와 관련한 검토를 수행하도록 규정하고, 상세 기준은 각국의 National Annex에서 제시하도록 하고 있으나, 현재 슬래브궤도가 부설된 독일에서만 DS 804의 부록 29[1]에서 이와 관련된 기준을 제시하고 있다. DS 804 부록 29의 상세 내용을 보면 한계상태(평가기준), 고려해야 할 주요 설계변수와 작용력, 체결장치 작용력의 조합 등에 대해 규정되어 있다. 그 주요 내용을 요약하면 아래와 같다.

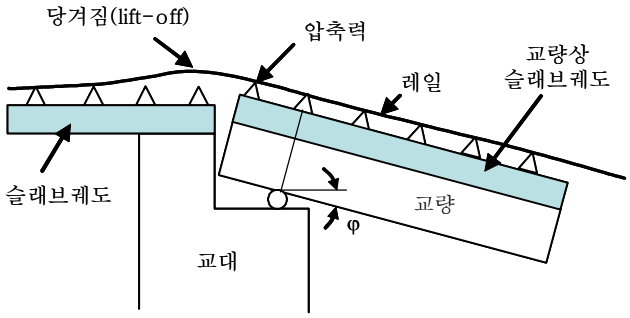


그림 1. 교량 단부 변형과 궤도 작용력

2.1 한계상태

교량 단부 사용성의 평가를 위한 한계상태를 DS 804에서는 “레일체결장치의 탄성지지체와 앵커시스템에서 공용기간 동안 아무런 손상없이 레일체결장치에 가해지는 상향력과 압축력을 충분히 흡수할 수 있어야 한다”라고 규정하고 있다.

여기서 상향력의 허용치는 레일체결장치의 초기 체결력으로 규정하였다. 즉 초기 체결력을 초과하는 하중이 작용하면 레일 하부의 패드에는 아무런 preload가 작용하지 않으므로 패드가 자유롭게 움직일 수 있는 상태가 된다. 따라서 패드가 밖으로 밀려나 체결장치에 추가적인 손상이 발생할 수 있다. 또한, 압축력에 대한 허용치는 탄성패드의 변형한계를 초과하지 않는 정도의 힘으로 규정하고 있다. 이를 요약하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\max\sum F_u \le F_0 \tag{1}$$

$$\frac{\max\sum F_c}{c_d} \le s_D \tag{2}$$

여기서,

$\max\sum F_u$, $\max\sum F_c$: 여러 가지 작용력에 따른 체결장치 상향력(F_u) 및 압축력(F_c) 합의 최대값

c_d : 동적 스프링계수 (압축력 검토 시에는 정적 스프링계수와 같다고 봄)

s_D : 탄성패드의 변형한계 (각 레일체결장치에 사용되는 탄성패드 특성에 따라 다름)

2.2 주요 설계변수

고려해야 할 중요 설계변수로는 우선 교량 설계와 관련된 영향인자로 교량 경간길이, 거더 강성, 교각의 높이, 강성 및 교각 하부 지지강성 등이 있으며, 이와 함께 궤도와 관련된 설계변수로는 마지막 레일지지점까지의 거리, 단부에서의 레일 체결간격, 레일체결장치의 스프링계수가 있다. 레일지지점의 스프링계수는 온도 및 가진주파수의 크기에 따라 달라질 수 있으므로 사용 환경과 해석조건에 맞는 스프링계수값을 적용해야 한다. 또한, 궤도 슬래브와 교량 보호층 콘크리트 사이의 탄성분리층을 사용하는 경우에는 탄성분리층의 스프링계수를 고려해야 한다. 이밖에 궤도-교량 상호작용과 관련하여 궤도의 종저항력 및 종방향 스프링계수 등도 아울러 고려해야 한다.

2.3 작용력

주요 작용력으로는 다음과 같이 정적 작용력과 동적 작용력으로 나누어 고려하도록 규정하고 있다

(표 1 참조). 정적 작용력으로는 자중과 크리프 및 건조수축(궤도 부설 이후 잔류분)을 고려한 장기 처짐과 상판의 상하부 온도차, 교각 기초의 잔류 부등침하에 의한 교량 상판 단부의 회전과 교각의 변형(레일-교량상판의 온도차 및 교각 전후면의 온도차에 의한)으로 인한 수직단차가 있다 (그림 2 참조). 또한 동적 작용력으로는 열차 수직하중에 의한 교량 상판 단부의 회전 및 수직단차(탄성받침 사용하는 경우에 한함)와 시· 제동하중에 의한 교각의 변형에 따른 수직단차, 열차 축하중에 의한 직접 작용력으로 구분할 수 있다. 열차 수직하중은 UIC 71하중선도 (철도건설규칙 HS-25 하중과 동일)를 분포하중으로 바꾸어 적용한다 (그림 3).

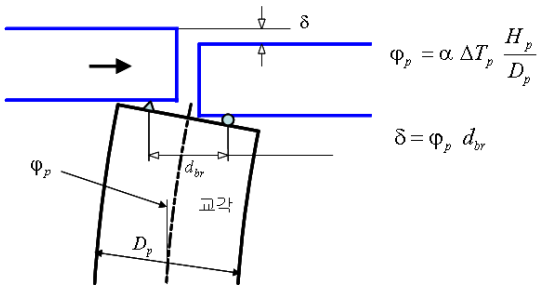


그림 2. 교각의 변형(온도차, 시제동하중 등)으로 인한 수직단차

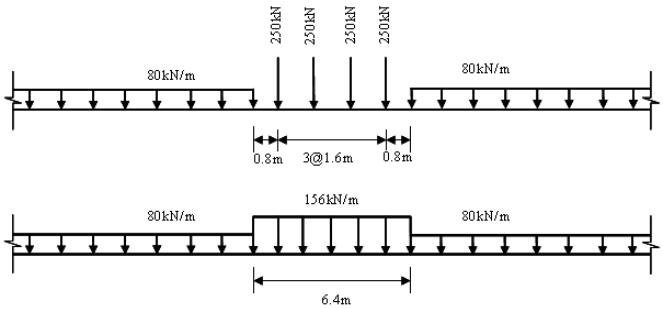


그림 3. UIC 71하중선도와 등가 분포하중선도

2.4 작용력의 조합

앞서 설명한 주요 작용력의 조합과 이에 따른 체결장치 상향력 및 압축력의 계산은 아래 식에 따르도록 규정하고 있다.

$$\sum F_u = \phi_{d,stat} F_{u\phi}(c_s, a, a_1) + \phi_{d,dyn} F_{u\delta}(c_d, a, a_1) + \delta_{d,stat} F_{u\delta}(c_s, a, a_1) + \delta_{d,dyn} F_{u\delta}(c_d, a, a_1) + \frac{P_d}{100} F_{up}(c_d, a) \quad (3)$$

$$\sum F_c = \phi_{d,dyn} F_{c\phi}(c_d, a, a_1) + \delta_{d,dyn} F_{c\delta}(c_d, a, a_1) + \frac{P_d}{100} F_{cp}(c_d, a) \quad (4)$$

여기서,

$\phi_{d,stat} = \sum \gamma_F\, \phi_{stat}$ $\quad \phi_{d,dyn} = \sum \gamma_F\, \phi_{dyn}$

$\delta_{d,stat} = \sum \gamma_F\, \delta_{stat}$ $\quad \delta_{d,dyn} = \sum \gamma_F\, \delta_{dyn}$

$P_d = \gamma_F\, m\, P$ (상향력 계산의 경우), $P_d = \gamma_F\, \alpha\, P$ (압축력 계산의 경우)

γ_F : 하중계수(표 1 참조)

m : 인접 축하중의 중첩을 고려하기 위한 계수 (중첩의 경우 m = 2, 비중첩의 경우 m = 1)

α : 열차속도를 고려하기 위한 계수 (α = 1.0, 속도 60km/h 이상인 경우 0.8 사용 가능)

c_s, c_d : 레일 지지점 정적 및 동적 연직 스프링계수 (압축력 계산의 경우 $c_d = c_s$적용)

a : 일반 구간의 레일 지지간격 (등간격)

a_1 : 상부구조 연결부의 레일 지지간격

$F_{u\phi}$, $F_{u\delta}$, F_{up}, $F_{c\phi}$, $F_{c\delta}$, F_{cp} : 단위 회전변위(1‰), 단위 수직단차(1mm), 단위 축하중(100kN)에 의해 각 레일 지지점에 발생하는 상향력(F_u) 및 압축력(F_c)

표 1. 주요 작용력과 하중계수

구분	작용력	하중계수 γ_F
정적	자중 + 잔류 크리프 및 건조수축 (궤도 부설 이후)	1.0
	교량 상부구조 상하면 온도차	1.0
	교각 잔류 부등침하	1.0
	레일-교량 상부구조 온도차에 의한 교각 상부 회전	1.0
	교각 전후면 온도차에 의한 교각 상부 회전	1.0
동적	열차 수직하중	1.3
	시 ·제동하중에 의한 교각 상부 회전	1.0
	축하중에 의한 직접 작용력	1.3

3. 예제해석 및 분석

3.1 해석모델링 및 해석방법

주요 설계변수의 영향을 살펴보기 위해 경간의 구성(단순교 또는 연속교), 교좌장치 형식 (Pot 받침 또는 탄성받침)과 교량 베어링(지점) 위치에서 마지막 레일체결위치까지의 거리, 단부에서의 레일 체결간격, 레일체결장치 스프링계수 등을 달리하여 해석을 수행하였다. 해석 대상 교량과 궤도의 주요 치수 조건과 모델 형상을 그림 4에 나타냈다. 교량은 국내 실제 교량의 제원을 참조하여 25m 4경간의 단순보로 구성하였다. 궤도 및 교량의 주요 제원과 물성은 부록 1에 나타냈다.

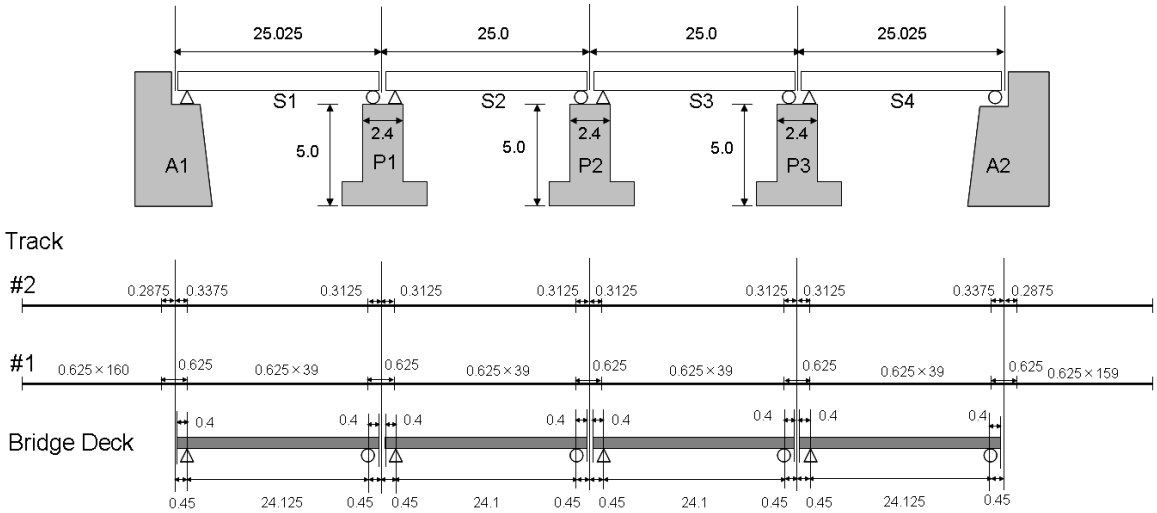


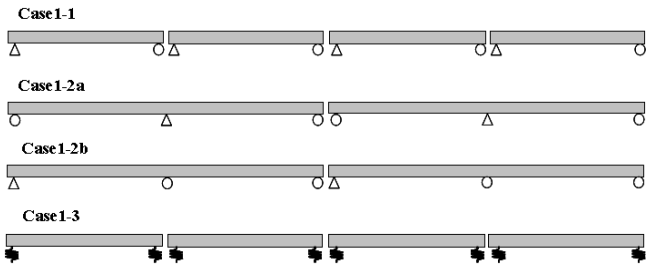
그림 4. 해석 대상 교량 및 궤도의 모형화

3.2 해석결과 및 분석

(1) 경간 구성 및 교좌장치 형식에 따른 영향

경간의 구성과 교좌장치 형식이 단부에 작용하는 힘에 미치는 영향을 살펴보기 위해 그림 5와 같이 단순교 또는 연속교로 하는 경우와 탄성받침을 사용하는 경우에 대하여 각각 예제해석을 수행하였다. 해석결과를 그림 6에 나타냈다. 그림 6에서 알 수 있듯이 단순교에 비해 연속교로 하고, 상부구조 접속부에 이동단을 두는 경우가 가장 낮은 상향력과 압축력을 나타내고 있음을 알 수 있다. 연속교인 경우에도 상부구조의 접속부에 고정단을 두는 경우는 접속부가 있는 교각에서의 상향력이 단순교에 비해 오

히려 커질 수 있음을 알 수 있다. 한편 탄성받침을 사용하는 경우에는 탄성받침의 지지강성에 따라 상향력 및 압축력의 변화가 크게 나타났다. Kx = 1.16E+04 kN/m, Ky = 4.58×106인 경우에는 Pot 받침을 사용한 경우보다 교각에서의 상향력과 압축력이 모두 감소하는 것으로 나타났고, 교대에서는 다소 커져 전체적으로 교대부와 교각부에서 균일한 힘이 작용하는 것으로 나타났다. 이는 탄성받침 사용 시에 교각 상단에 작용하는 수평력을 완화시켜주고, 반면 열차수직하중 작용 시 단차의 발생이 커지는 상반된 현상이 발생하기 때문이다. 탄성받침의 지지강성이 case1-3a의 경우보다 더 낮아지면 상향력과 압축력 모두 현저히 증가하는 것으로 나타나 탄성받침의 사용 시에는 주의가 요망된다.



	Kx [kN/m]	Ky [kN/m]
a	1.16E+04	4.58E+06
b	7.74E+03	3.05E+06
c	4.64E+03	1.83E+06

그림 5. 경간구성 및 교좌장치 형식 구분

(2) 교량 베어링(지점) 위치에서 마지막 레일체결위치까지의 거리 및 단부에서의 레일 체결간격에 따른 영향

그림 4의 기본 제원에서 단부에서의 레일 체결간격을 0.55m에서 0.85m까지 바꾸면서 예제해석을 수행하였다. 이에 따라 교량 베어링(지점) 위치에서 마지막 레일체결위치까지의 거리는 교각부의 경우 0.025~0.175m, 교대부의 경우 0~0.15m까지 변화하게 된다. 그림 7에 해석결과를 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 교량 베어링(지점) 위치에서 마지막 레일체결위치까지의 거리가 커질수록 (단부에서의 레일 체결간격이 작아질수록) 상향력은 증가하는 반면 압축력은 작아지는 것으로 나타났다. 실제의 경우 압축력보다는 상향력이 더 결정적인 경우가 많기 때문에 가급적 교량 베어링(지점) 위치와 마지막 레일 체결장치까지의 거리는 최소화하는 것이 유리하다고 볼 수 있다.

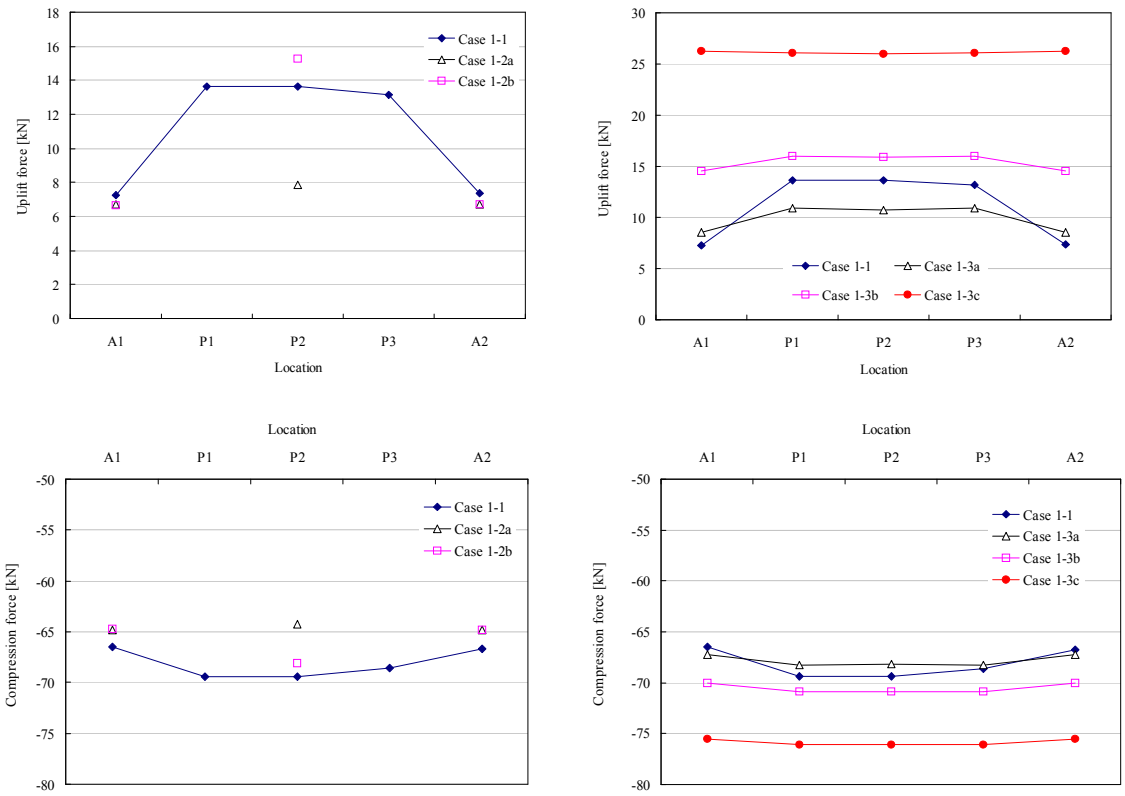


그림 6. 경간 구성 및 교좌장치 형식에 따른 체결장치 상향력 및 압축력 비교

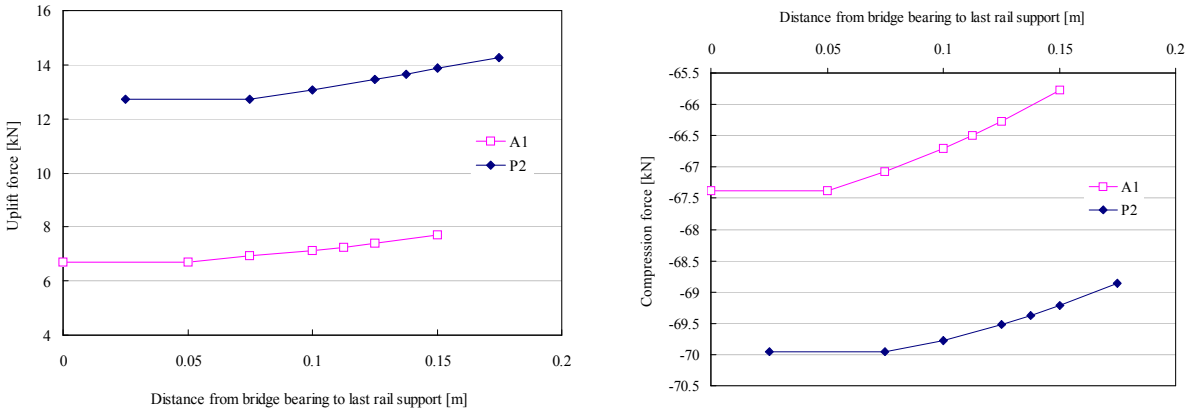


그림 7. 교량 베어링(지점) 위치에서 마지막 레일체결위치까지의 거리 및 단부에서의 레일 체결간격에 따른 체결장치 상향력 및 압축력 비교

(3) 레일 체결장치 스프링강성에 따른 영향

다음으로 레일 체결장치의 스프링강성을 정적 지지강성을 기준으로 20~100 kN/mm까지 변화하면서 예제해석을 수행하였다. 해석결과를 그림 8에 나타냈다. 그림에 따르면 레일 체결장치의 스프링강성이 증가할수록 상향력이 증가하며, 특히 교각부에서 현저히 증가하는 경향을 보여주고 있다. 압축력의 경우도 레일 체결장치의 스프링강성 증가에 따라 커지지만 체결장치의 스프링강성이 커지면 패드의 변형량은 작아지므로 압축력의 증가가 반드시 악영향을 주는 것으로 보긴 어렵다.

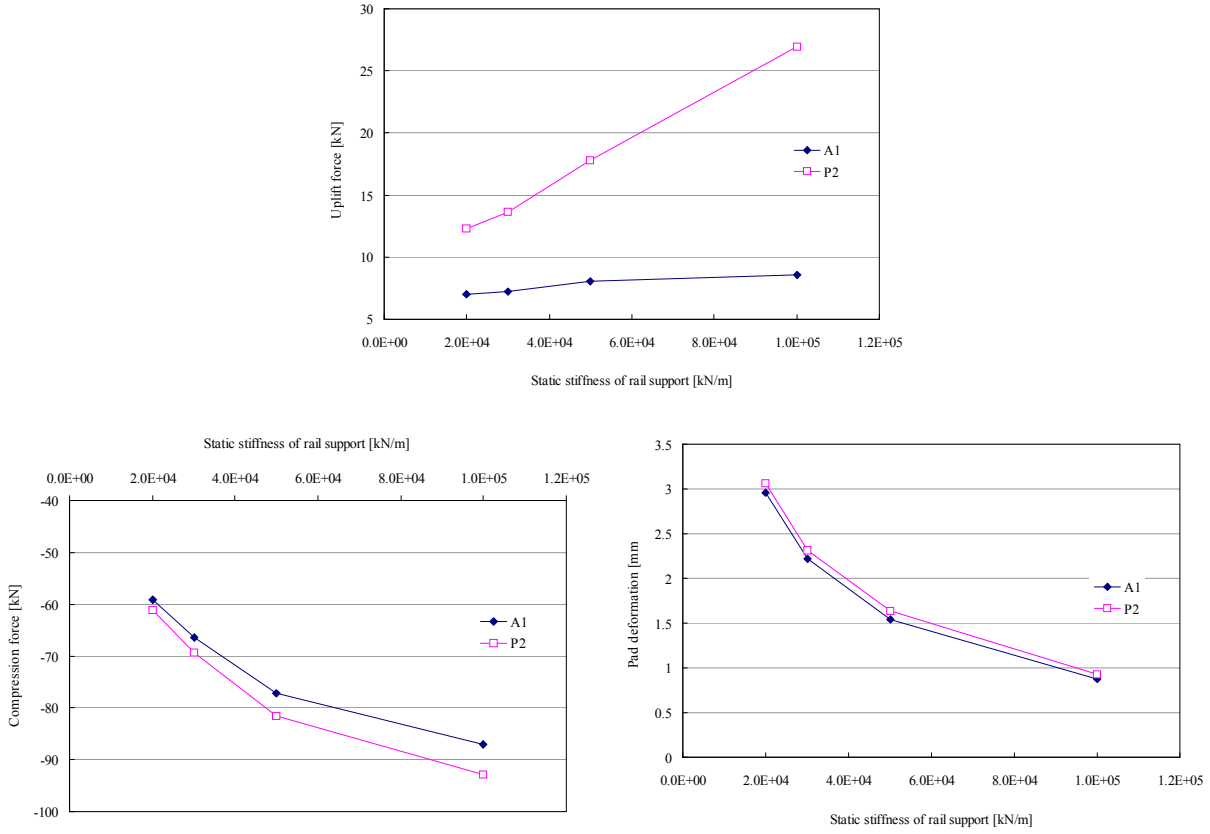


그림 8. 레일 체결장치 스프링강성에 따른 체결장치 상향력 및 압축력 비교

4. 결론

본 연구에서는 교량 단부의 변형으로 인해 궤도에 발생하는 부담력과 이에 따른 교량 단부의 사용성을 평가하는 국외 기준을 검토하고 이를 바탕으로 실제 교량을 대상으로 교량 단부에서 작용하는 체결장치 부담력에 미치는 교량 및 궤도의 여러 가지 영향인자를 분석하였다. 분석결과 교량 단부 지점과 마지막 체결점까지의 거리, 레일 지지간격, 레일 지지 스프링강성과 더불어 교좌장치 배열 및 교좌장치 스프링강성 등이 중요한 영향인자로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국철도시설공단에서 재정적 지원을 받고 있는 “콘크리트궤도 인터페이스 성능향상에 대한 연구용역”의 일환으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. DS 804 App. 29, Bridge deck ends - check for serviceability limit state of superstructure, Sep. 2000.
2. BS EN 1990-2002 A1, Basis of structural design, Annex A2.4.4 - Verifications regarding deformations and vibrations for railway bridge, 2005.

부록

1. 궤도 및 교량의 주요 제원 및 물성

(a) 기본입력변수

항 목		입력값	비고
침목간격 [m]		0.625	
레일물성 (레일2조)	단면적 [m²]	1.29E-02	
	단면2차모멘트 [m⁴]	6.04E-05	
하중조건	수직하중	UIC-71 (HS-25)	객화차 혼용
	온도하중(레일최고온도)	45°C	

(b) 레일체결장치 특성

수평방향			수직방향	
종방향 스프링계수 [kN/m/m]	종저항력 (비재하) [kN/m]	종저항력 (재하) [kN/m]	정적 [kN/m]	동적 [kN/m]
10000	20	60	6.00E+04	9.00E+04

(c) 교량 상판 geometry 및 물성

스팬 번호	상판 좌측 지점 위치 [m]	상판 우측 지점 위치 [m]	좌측 지점~단부 거리 [m]	우측 지점~단부 거리 [m]	탄성계수 [kN/m²]	단면적 [m²]	단면2차 모멘트 [m⁴]	중립축 ~ 상판 상면 거리 [m]	중립축 ~ 상판 하면 거리 [m]	열팽창 계수 [1/°C]	단위 중량 [kN/m³]
S1	100.7375	124.8625	0.4	0.4	2.793E+07	7.3032	6.2892	1.0322	1.5478	1.20E-05	23.54
S2	125.7625	149.8625	0.4	0.4	2.793E+07	7.3032	6.2892	1.0322	1.5478	1.20E-05	23.54
S3	150.7625	174.8625	0.4	0.4	2.793E+07	7.3032	6.2892	1.0322	1.5478	1.20E-05	23.54
S4	175.7625	199.8875	0.4	0.4	2.793E+07	7.3032	6.2892	1.0322	1.5478	1.20E-05	23.54

(d) 교각 geometry 및 물성

교각 번호	탄성계수 [kN/m²]	단면적 [m²]	단면2차 모멘트 [m⁴]	단위중량 [kN/m³]	교좌 장치 형식	교각 위치 [m]	교각 높이 [m]	교각 지름 [m]	교각 하부 지지 스프링		
									Kx [kN/m]	Ky [kN/m]	Km [kN m]
P1	2.320E+07	7.60	2.30	23.54	○△	125.3125	5	2.2	2.1576E+08	1.7035E+08	1.2277E+09
P2	2.320E+07	7.60	2.30	23.54	○△	150.3125	5	2.2	2.1546E+08	1.6344E+08	1.1779E+09
P3	2.320E+07	7.60	2.30	23.54	○△	175.3125	5	2.2	2.1546E+08	1.6344E+08	1.2277E+09