

콘크리트도상 궤도 교량단부 상향력 해석 및 적용

The Analysis and application of Rail uplifting on concrete track of bridge ends

이주헌* 서사범** 이상진*** 김재학**** 김한종*****
Lee, Joo-Heon Seo, Sa-Beom Lee, Sang-Jin Kim, Jae-Hak Kim, Han-Jong

ABSTRACT

The deformations of bridges at the areas of bridge transitions or at the foundation of bridge pier cause additional deformations at the rails and consequently larger forces in the rail fastener. To ensure the serviceability of the railway, a residual compressing force have to remain in the rail pad underneath the rail foot. That can be achieved by limitation of the rail fastener forces. All possible load cases, which cause a deformation of the bridge, have to be superposed with those causing a deformation of the rail.

The potential critical fasteners with the highest uplift forces are the fastener adjacent to the civil joint. The main influencing factors are the geometry of the bridge (beneath length of overhang, relative position of bridge bearing and fastener, deflection of bridge) and the vertical spring stiffness of the fastener

1. 서론

교량과 토공의 접속부 및 교각 구조물 기초에서 침하가 발생하는 경우 레일에 부가적인 변형 가져오며 따라서 동시에 체결장치에도 부가적인 힘이 전달되는데 이때 콘크리트도상 궤도구조의 경우 궤도구조의 특성상 자갈도상 궤도구조 보다 큰 값을 나타낸다.

선로 즉 특히 콘크리트도상 궤도구조에 대한 사용성을 보장하기 위해서는 잔류 압축응력이 레일체결장치에 발생하는데 이때 압축응력은 궤도구조에 적용하는 체결장치의 종류 및 특성에 따라 달라지며 각 체결장치에 해당하는 허용 범위내로 유지되어야 한다. 따라서 교량에 변위를 발생시키는 예상 가능한 하중케이스를 고려하여야 하며 또한 레일에 변위를 일으키는 조건과 하중조합이 필요하다.

이때 교량상판-레일체결장치간에 발생하는 최대인장력은 토목신축이음매에 가장 근접해 위치한 레일체결장치에서 발생한다. 즉 최대인장력 값에 영향을 미치는 인자로는 교량의 기하학적 특성(교량받침~토목신축이음매간 거리, 교량받침-레일체결장치간 상대 위치, 교량의 최대 처짐량) 및 레일체결장치의 수직스프링계수를 들 수 있다.

현재까지 국내에는 지하철구간에 교량상 콘크리트 궤도가 일부 적용되는 경우가 있으나 저속선의 특성상 사용성문제가 크게 대두되지 않아 본 해석 및 적용의 사례가 없었다.

따라서 본 해석방법 및 적용은 콘크리트도상 궤도구조이며 고속선인 경부고속철도 2단계구간인 대구~부산간 교량상 콘크리트도상 궤도구조에 대해 검토하였다. 이때 검토기준 및 방법은 콘크리트도상 궤도구조에 경험이 풍부하고 설계기준이 있는 독일의 기준에 따라 수행하였다.

* (주)한국철도기술공사 과장, 정회원

** 한국철도시설공단 궤도기술팀장, 정회원

*** (주)한국철도기술공사 전무, 정회원

**** (주)한국철도기술공사 상무, 정회원

***** (주)한국철도기술공사 차장, 정회원

2. 해석관련 기초

2.1 일반사항

레일체결장치 상향력 해석에서는 열차 수직하중, 기초침하 및 상판 상하연 온도차 등에 의해 교량상판의 휨이 발생할 때 교량상판-레일체결장치간 인장력을 계산하였다.

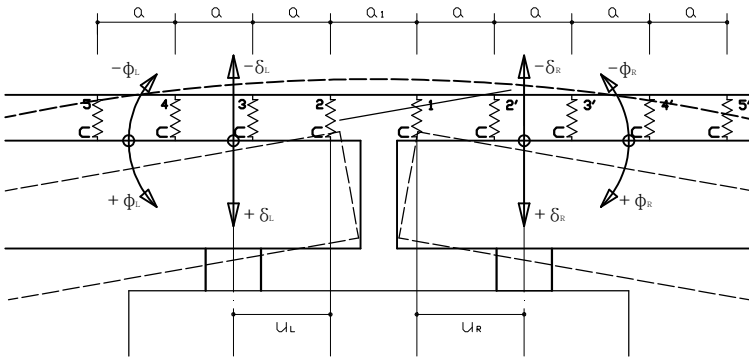
이때 교량상판-레일체결장치간 최대 인장력은 토목신축이음매에 가장 근접해 위치한 레일체결장치에서 발생한다. 따라서 최대인장력 값에 영향을 미치는 인자로는 교량의 기하학적 특성(교량받침~토목신축이음매간 거리, 교량받침-레일체결장치간 상대 위치, 교량의 최대 처짐량) 및 레일체결장치의 수직스프링계수를 들 수 있다.

따라서 교량상판 단부에서의 변위는 레일에 추가적인 변위를 발생시키며 동시에 레일체결장치에 부가인장력을 발생시키는데 허용기준값 이내로 제한하여야 선로의 내구성 및 사용성을 보장할 수 있다.

이때 해석방법은 DS804 Appendix 29를 참조하였으며 이때 교량의 최대 처짐을 발생시키는 모든하중을 조합하여 적용하였다.

아래와 같은 3개의 하중케이스에 단위변위와 단위하중을 적용하였으며 다음과 같다.

- 지지점(교량받침)에서 단위 회전각($\phi=+1\%$)
- 각 지지점(교량받침)에서 지점처짐($\delta=1\text{mm}$)
- 레일상에 단위윤중($P=100\text{kN}$)



〈그림-1〉 레일 체결장치 거동 시스템

- a : 침목배치 간격 u : 내민거리
c : 레일체결장치 스프링계수 ϕ : 회전각 δ : 변위

〈그림-1〉은 침목배치 간격이 일정하게 배치된 경우 단위변위 또는 단위하중 적용시 거동형태로, 레일체결장치 상향력 해석시 레일체결장치와 교량받침간의 거리가 주요한 인자임을 알 수 있다.

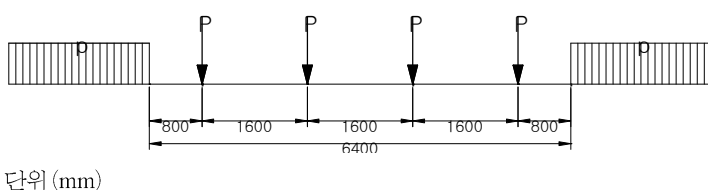
레일체결장치 상향력 산정은 단위변위 및 단위하중으로 계산된 각각의 레일체결장치에서 발생한 인장력을 합산한다. 하중 케이스는 다음의 3항에 제시하였다.

열차하중에 의한 교량상판 단부 회전에 따른 레일체결구 상향력 계산시 하중계수 및 레일 변위 계산은 동적증가계수를 적용하였다.

이때 교량상 각 하중케이스를 조합한 상태에서의 레일체결구의 최대 상향력 값과 표준 레일체결장치의 허용값¹⁾의 비교가 필요하다. 본 논문에서는 Pandrol SFC 체결장치를 적용하였다.

2.2 기초입력 제원

○ 차량수직하중



단위(mm)

〈그림-2〉 고속철도하중 (UIC71)

본 해석에 적용하는 수직 활하중은 〈그림-2〉의 고속철도하중(UIC71과 동일)을 적용하였다. 이는 실제 KTX 차량 하중의 적용보다 큰 값으로 보다 보수적인 값을 얻을 수 있다.

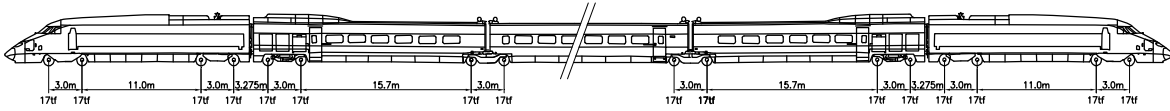
그러나 차량하중 해석의 경우 UIC71의 경우 집중하중간 간격이 작아 실제 KTX 차량을 적용하는 것이

1) Pandrol SFC 체결장치 : 21.5kN, Ioarv300 (Sk115, Zwp 104) 체결장치 : 12kN

체결장치에 보다 큰 부반력(- reaction)를 얻을 수 있다. 따라서 차륜하중 해석의 경우는 KTX하중을 적용하였으며 이때 KTX 차량에 대한 축간거리 및 하중 등 기초 제원은 <그림-3>과 같다.

축중 : 각 축당 17kN

차량총연장 : 380.15m (20량 양단 축간 거리 기준)



<그림-3> KTX 하중

○ 체결장치 특성

스프링계수	값 (kN/mm)	비 고
정적스프링계수	45.407	피로저항시험 전
	47.971	
동적스프링계수	71.075	

<표-1> SFC 레일체결장치 스프링계수

본 해석에서 적용하는 레일체결장치의 공칭 스프링계수는 20~50kN/mm로 이는 한국철도시설공단의 규격 및 SITAC회의시 추천된 값이다.

이에 본 계산서에서는 Pandrol SFC 레일체결장치에 대해 국내 공인시험기관인 KIMM에서 시험한 스프링계수를 적용하였으며 그 값은 다음 <표-1>과 같다.

○ 기하학적 특성

1) 레 일

UIC60

- 단면적 : 7,686mm²
- 단면2차모멘트 : 3,055cm⁴
- 탄성계수 : 210,000MN/m²

2) 침목배치간격 및 교량받침~교량단부간 거리

경부고속철도 2단계 구간의 경우 교량 경간구성 형식이 2@40m을 기본으로 울산정거장 전후 언양고가 및 중과고가의 경우 최대 6경간 연속교로 다양하게 구성 되어 있다. 본 설계에 반영하는 콘크리트도상 궤도의 경우 콘크리트의 건조수축, 크리프 및 배수를 위해 일정한 간격으로 도상콘크리트가 나뉘어져 있다. 따라서 본선 일반구간의 경우 침목배치간격이 650mm이나 교량구간의 경우 교량형식별로 다양하게 배치하였다.

각 교량 형식별 교량의 기하학적 조건중 하나인 토목신축이음매가 설치된 교량상판의 단부로부터 교량받침간 거리는 <표-2>와 같다.

교량형식	침목배치간격	교량받침/교량단부 거리
2@40m	615mm	0.85m
3@25m	625mm	0.70m
2@25m, 1@50m	600 (48.2m) / 620mm (6.8m)	0.70m
2@50m	645 (92.4m) / 635mm (7.6m)	0.90m
2@35m	650 (62.0m) / 615mm (7.9m)	0.70m
1@40m	615mm	0.85m
1@25m	625mm	0.70m
1@35m	620mm	0.70m
1@54m	645mm	0.90m
1@75m	625mm	1.30m
55/60/60/60/55m, 50m 50m, 40/40/40/40/40/40m	분기기 설치구간	1.10m

<표-2> 침목배치 간격 및 교량받침/교량단부 거리

3) 교량경간 구성 및 제원

레일체결장치 상향력에 영향을 미치는 요인으로는 교량의 기하학적 조건 (교량단부~교량받침간 거리, 교량받침~레일체결장치간 상대변위, 상판의 처짐량)과 체결장치의 수직 스프링계수를 들 수 있다. 따라서 본 논문에서는 과업 전구간 교량에 대해 교량형식 및 제원을 <표-3>와 같이 총 21개 타입으로 구분화하여 해석하였다.

경간 형태	번호	E	A	I _{yy}	경간구성
	1	28571	12.3842	20.300	40/40, 40/40
	2	28571	10.9917	10.999	25/25, 25/25
	3	28571	11.9246	12.117	25/25, 25/25
	4	28571	10.9917 12.3842	10.999 (25) 20.300 (40)	25/25, 40/40
	5	28571	12.3842	20.300	35/35, 35/35
	6	28571	12.3842	20.300	35/35, 40/40
	7	28571	10.9917	10.999	25/25, 25/25/25
	8	28571	11.9246	12.117	25/25, 25/25/25
	9	28571 28571	12.3841 13.3100	20.300 (40) 30.672 (50)	40, 50/50
	10	28571 103304	12.3841 11.4467	20.300 (40) (50)	50, 40/40
	11	28571	12.3841	20.300	40, 40/40
	12	28571 28571	13.3100 11.9246	30.672 (40) 12.117 (25)	40, 25/25/25
	13	28571	11.9246	12.117	25/25/25, 25/25/25
	14	125604 125604 133400 149633	13.480 13.480 14.850 18.840	13.759 (55) 13.759 (60) 13.930 (55) 18.844 (50)	55/60/60/60/55, 50
	15	149633 28571	18.840 12.200	18.844 (50) 20.324 (40)	50/40
	16	28571	12.200	20.324	40/40
	17	28571	12.200	20.324	40/35
	18	28571 96845	12.200 20.970	20.324 (40) 17.090 (40)	40/40
	19	96845 137494	20.970 27.400	17.090 (40) 30.410 (50)	40/50
	20	139571	35.740	70.160	54/54
	21	137494 96841	27.400 20.970	30.410 (50) 17.090 (40)	50, 40/40/40/40/40/40

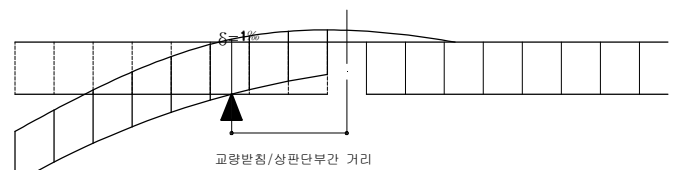
<표-3> 교량경간 구성 및 제원

3. 레일체결장치 상향력 구조해석

3.1 단위변위량 (δ_L, R=1%) 해석

레일체결장치에 발생하는 힘을 계산하기 위해 단위변위량을 발생시키는 하중을 적용하여 해석을 수행하였다. 해석 기본 가정 모델은 <그림-4>와 같다.

교량받침 상 레일이 단위 변위 δ=1%가 발생할 때 레일체결장치에 발생하는 반력을 계산하였다. 이때 단위변위량 해석시 <표-2> 침목배치



<그림-4> 단위변위 δ_L=1%

간격 및 교량받침/교량단부 거리 및 <표-3> 교량경간 구성 및 제원과 체결장치 스프링계수로 C_{sta} = 47.971kN/mm와 C_{dyn} = 71.075kN/mm를 적용하였다.

3.2 열차하중 산정

고속철도하중(UIC71)에 대해 수직방향 활하중을 산정 시 아래와 같은 하중계수를 적용하였다.

$$P = P_{stat\ UIC71} \times (R_2 \times \lambda \times \phi)$$

여기서

R_2 : 동적계수 (열차속도 및 교량경간에 따른 함수)

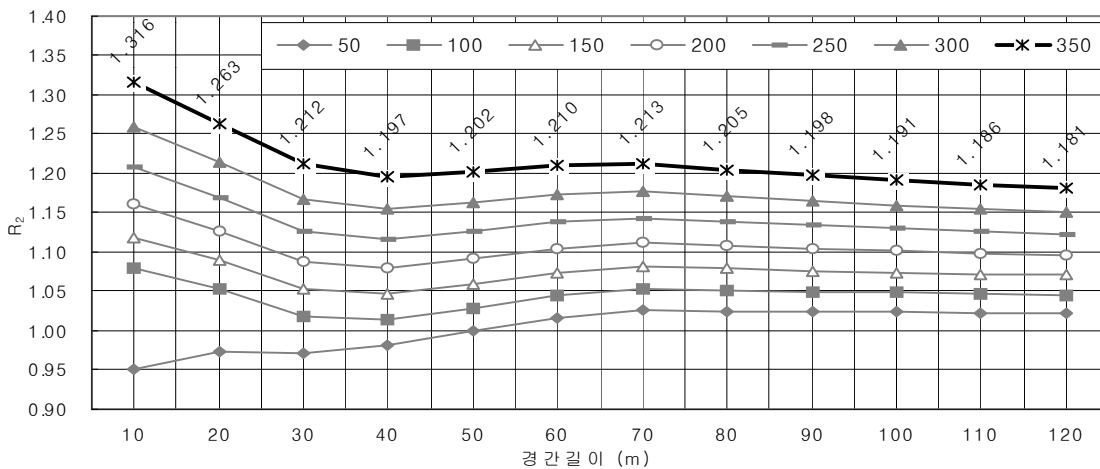
λ : 감소계수

ϕ : 충격계수

KTX 열차속도 및 교량 경간길이에 따라 수직방향 활하중을 산정한다.

○ 동적계수 R_2

열차속도에 따른 동적계수는 아래와 <그림-5>와 같다. (DS804 Appendix 29)



<그림-5> 경간 길이에 따른 동적계수

○ 감소계수 λ

$0.4 \leq \lambda = (0.8 - 0.4(L - 3) / 7) \leq 0.8$ (DS804 Appendix 29)

○ 충격계수 ϕ

교량 경간길이에 따른 충격계수는 아래 <표-4>와 같다. (DS804 Appendix 29)

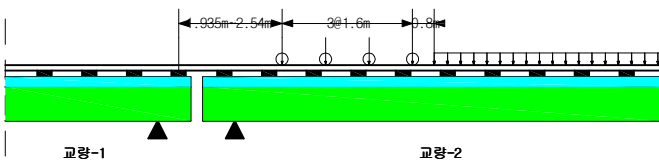
L_ϕ (m)	≤ 3.61	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
ϕ	1.67	1.62	1.53	1.46	1.41	1.37	1.33	1.31	1.28	1.26	1.24	1.23	1.21	1.20	1.19
L_ϕ (m)	18	19	20	22	24	26	28	30	35	40	45	50	55	60	≥ 65
ϕ	1.18	1.17	1.16	1.14	1.13	1.11	1.10	1.09	1.07	1.06	1.04	1.03	1.02	1.01	1.00

<표-4> 경간 길이에 따른 충격계수

3.3 열차하중 재해석

아래 하중조합은 교량상에 열차하중(UIC71) 하중이 각기 다른 위치에 배치하여 체결장치에서 발생하는 최대 반력을 계산하였다.

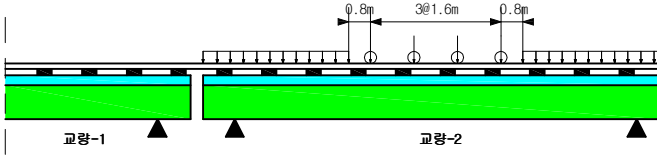
○ Loadcase 1



○ 교량-1에는 변위가 발생하지 않고 교량-2에만 변위 발생

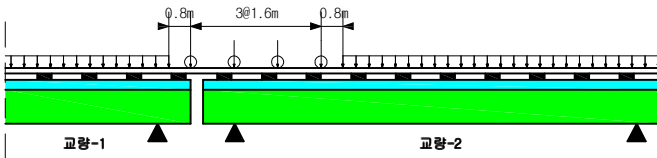
○ 교량상관의 길이가 다양할 경우 체결장치에서 최대 반력을 발생토록 Loadcase 위치를 결정

○ Loadcase 2



- 교량-1에는 변위가 발생하지 않고 교량-2에만 변위 발생
- 집중하중의 중심 위치가 교량-2의 중앙에 위치토록 배치함

○ Loadcase 3



- 집중하중의 시점이 교량-1의 종점에 위치토록 배치

3.4 온도하중 해석

교량의 온도하중 경사는 다음과 같다.

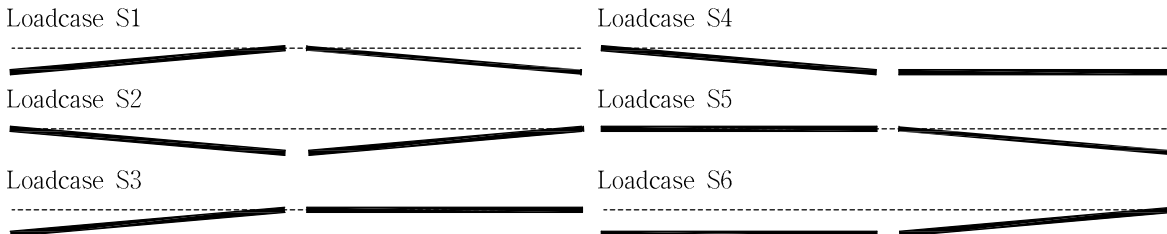
$$\phi_{\Delta t} = \frac{L}{2} \times \frac{\alpha_t \times \Delta t}{h}$$

Δt = 교량형식 별 온도변화량, α_t = 열팽창계수, h : 상판 높이, L : 경간 길이

3.5 지점침하 해석

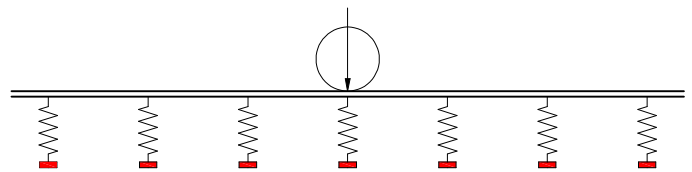
토목구조물 완성 및 궤도 시설물 등의 공사가 완료된 후 발생가능한 인접 교각간 불균등한 수직 침하가 발생할 수 있다. 본 계산에서는 부등 지점침하에 의한 단부 회전량을 0.2‰로 가정하였다. 이때 발생하는 부등 지점침하량은 레일 체결장치의 수직 조정범위내에 있으므로 궤도에서 조정이 가능하다.

부등침하 발생의 Loadcase는 다음과 같이 적용하였다.



3.5 차륜하중 해석

수직 차륜하중에 의해 레일체결장치에 압축 및 인장력이 발생한다. 이 압축 및 인장력은 레일의 강성, 레일체결장치, 하중의 크기와 관계 있다. 따라서 차륜하중 해석시 적용하중에 동적증가계수를 고려하여 적용하였다. (DS804) 이때 동적증가계수는 궤도선형과 차륜의 불균일성 및 차량에 의해 발생하는 고주파진동과 같은 영향을 고려하기 위해 적용한다. 이때 차륜하중 해석모델은 <그림-6>과 같다.



<그림-6> 윤중(1개) 작용시 레일/레일체결장치간 해석 모델

$$P_{\text{wheel}} = P_{\text{statUIC71}} \times \frac{1}{2} \times f_{\text{dyn}} = 250 \times \frac{1}{2} \times 1.68 = 210\text{kN}$$

$$f_{\text{dyn}} = (1 + 3 \cdot s') \cdot f_b$$

$$= (1 + 3 \cdot 0.167) \cdot 1.12 = 1.68$$

s' : 표준편차 (열차속도 $V \geq 60\text{km/h}$ 의 경우), f_B : 곡선 외측구간 하중 증가율

체결장치간격	최대반력 (+) (kN)	하중지점~체결장치위치 (m)
600mm	1. 68968	2. 4
615mm	1. 65464	2. 46
620mm	1. 64128	2. 48
625mm	1. 62714	2. 5
635mm	1. 5967	2. 54
645mm	1. 66842	1. 935
650mm	1. 7096	1. 95

〈표-5〉 체결장치간격별 최대반력 및 최대 하중지점간 간격

상향력은 1개 차륜이 작용할 때 최대 값이 발생함을 알 수 있다.

레일 체결장치의 동적 스프링계수를 71.075kN/mm 로 적용하여 체결장치 간격별 최대 반력과 이때 체결장치간 간격은 다음 〈표-5〉과 같다.

검토결과 1개 차륜에 의해 발생하는 체결장치 최소간격은 체결장치 간격이 645mm 일 때 1.935m로 차륜간 간격은 3.87m임을 알 수 있다.

즉 차륜간 간격은 KTX의 경우 최대 3.275m로 체결장치에 최대반력을 발생시키는 간격인 3.87m 이 내에 위치 한다. 따라서 체결장치에 발생하는 최대

3.6 하중조합 (Load combination)

상기 각각 해석의 결과를 조합하여 체결장치에 발생하는 최대 반력을 계산하고 레일체결장치(Pandrol SFC) 상향력에 대한 허용기준과 검토하였다.

4. 해석결과

본 레일체결장치 상향력 구조해석 및 적용에서는 열차하중, 온도하중경사 및 지점침하 등 다양한 하중에 의해 체결장치에 발생하는 수직반력을 계산 후 체결장치의 허용 상향력 기준을 초과하는지에 대한 검토를 수행하였다.

체결장치의 허용 상향력을 초과하는 경우 열차운행시 레일의 들림에 의해 승차감 저하 및 선로 내구성 저하가 발생할 수 있다. 따라서 허용기준(Pandrol SFC 체결장치 : 21.5kN, Ioarv300 (Sk115, Zwp 104) 체결장치 : 12kN)을 초과하는 위치에 허용기준을 상회하는 레일체결장치 적용이 필요하다.

해석결과 허용기준을 초과하는 경우 이를 수용할 수 있는 특수 레일체결장치로 변경 적용하여야 한다.

본 레일체결장치 상향력 해석 및 검토 결과에서는 해석모델 15번(언양고가 50m/40m)의 경우 최대 19.609kN이 발생하나 이는 체결장치 제조사에서 제시하는 허용값 이내로 본 과업 전구간에 레일들림에 대한 특수체결장치 적용은 필요 없음을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] DS804 (B6) -Sep. 2000, Regulation for bridges and other civil structures, Deutsche Bahn Gruppe, DB Netz ("German Railway Code") Appendix 29
- [2] Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn, 3. uberarbeitete Auflage, Stand 15.10.1995 ("Catalogues for construction of slab track"), Deutsche Bahn Gruppe, DB Netz
- [3] 레일체결장치 시험성적서 (경부고속철도용 레일체결장치 성능시험, KIMM, 2005)
- [4] LUSAS V13.7 Manual (범용 구조해석용 프로그램)