

콘크리트궤도부설 교량의 접속슬래브 허용변위한도에 관한 연구

The Allowable Displacement Limit on the Approach Slab for a Railway Bridge with Ballastless Track

최진유* 양신추** 유진영*** 조현철****
Choi, Jin Yu Yang, Shin Chu Yoo, Jin Young Cho, Hyun Cheol

ABSTRACT

The transition area between a bridge and an earthwork is one of the weakest area of track because of the track geometry deterioration caused unequal settlement of backfill of abutment. In case of a ballastless track, the approach slab is installed to prevent the phenomenon. But, if there is occurred the inclined displacement on the approach slab by a settlement of the foundation or formation, the track is also under the inclined displacement. And this defect causes reducing the running stability of a vehicle, the riding comfort of passengers, and the deteriorations of track by excessive impact subjected to the track. In this study, parametric studies were performed to know what is the allowable displacement limit on the approach slab to avoid such a bad effect. The length and amount of unequal settlement of the approach slab was adopted as parameter for numerical analysis. And car body accelerations, variations of wheel force and rail stress and uplift force induced on a fastener clip are investigated. From the result, resonable settlement limits of an approach slab according to slab length was suggested.

1. 서론

교량과 토공의 접속부는 궤도의 대표적인 취약구간으로서 교대배면의 부등침하로 인한 궤도틀림발생이 빈번하여 유지관리에 많은 어려움을 겪고 있는 구간 중의 하나이다. 콘크리트궤도부설구간의 경우에는 교대배면의 부등침하를 방지하기 위하여 접속슬래브 부설이 일반화되고 있는 추세이다. 이 경우, 접속슬래브를 지지하고 있는 노반의 침하 등으로 인하여 접속슬래브에 부등경사처짐이 발생하게 되면 동시에 궤도에도 부등경사처짐이 발생하게 되며, 이로 인해 차량주행안정성과 승차감의 저하, 그리고 과도한 충격에 의한 궤도의 손상을 유발하게 되므로 접속슬래브의 허용처짐한도를 제한할 필요가 있다. 본 연구에서는 콘크리트궤도 부설 교량과 토공의 접속부에 부설되는 접속슬래브의 부등처짐 허용한도를 알아보기 위한 연구를 수행하였다. 접속슬래브의 길이와 단부처짐량을 매개변수로 하여 차체가속도, 윤중변동률, 레일저부응력, 그리고 체결구에 발생하는 상향압력을 분석하여 접속슬래브의 길이에 따른 단부처짐의 허용한도를 알아보았다.

2. 콘크리트궤도용 접속슬래브

콘크리트궤도가 적용된 구간에서의 교량-토공접속부의 부설을 위해서는 노반의 엄격한 품질관리가 필요

* 최진유, 정희원, 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부 궤도구조연구팀

E-mail : jychoi@krri.re.kr

TEL : (031) 460-5338 FAX : (031) 460-5814

** 한국철도기술연구원 책임연구원

*** 한국철도시설공단 기술본부 KR기술연구소 과장

**** 고려대학교 건축·사회환경공학과 대학원 석사과정

한데, 노반의 침하를 방지하기 위하여 고급재료의 뒷채움재를 사용하여야 하며, 특별한 다짐을 시행하도록 하고 있다. 토공구간과 접하는 슬래브의 단부에서 침하가 예상되는 개소에서는 단부에 파일기초 또는 그림1에 보이는 것과 같은 정착단부(End beam)로 보강을 하는 것이 일반적이다. 접속슬래브의 폭은 교량상과의 폭과 동일하게 하고, 슬래브의 두께는 일반적으로 20~30cm 정도로 설계하나 부등침하 및 공극의 발생이 우려되는 개소에서는 상부에 작용하는 열차하중을 고려하여 충분한 강도를 갖도록 설계하는 것이 일반적인 것으로 알려져 있다. 다음 그림은 콘크리트궤도가 일반적인 독일에서 주로 적용되는 교량과 토공구간 접속부의 접속슬래브의 형식이다.

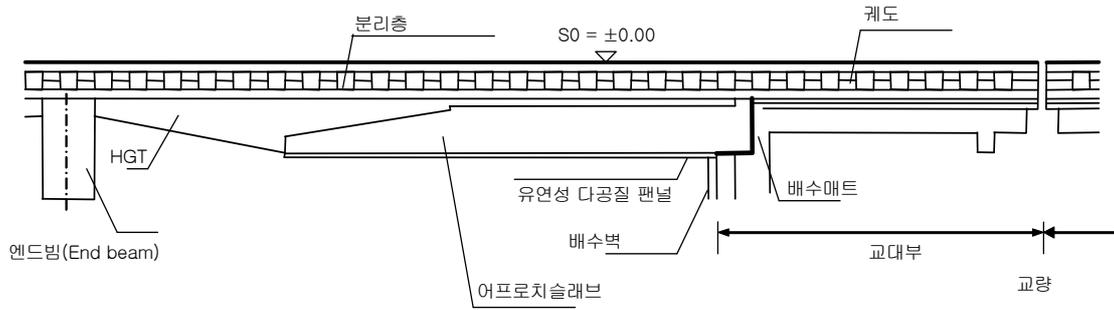


그림 1. 슬래브궤도 교량/토공구간 접속슬래브설계

접속슬래브가 설치된 접속부에서의 변형은 토공부의 침하로 인하여 접속슬래브의 단부에 처짐이 발생하는 경우가 일반적인 현상이라고 볼 수 있으며 그 처짐의 형상은 다음 그림과 같다.

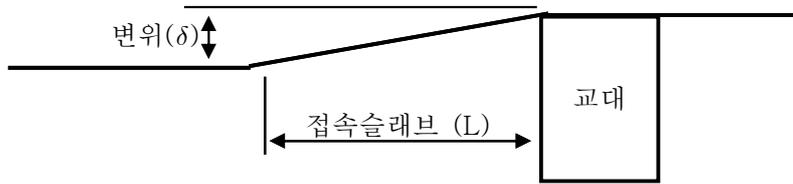


그림 2. 슬래브궤도 교량/토공구간 접속슬래브의 처짐 형상

3. 접속슬래브의 허용처짐한도를 산정하기 위한 검토 기준

교량과 토공구간의 접속구간에서 차량의 주행안전성을 보장하고 궤도의 급격한 파손을 막기 위해서는 접속구간을 통과하는 차량과 궤도의 상호작용에 의한 응답을 검토할 필요가 있다. 차량의 승차감을 확보하기 위해서는 차체의 상하진동가속도에 대한 검토가 필요하며 차량의 주행안전성을 확보하기 위해서는 접속부 통과시의 차량 윤중감소의 정도를 검토하여야 한다. 또한 접속부 통과에 따른 충격이 궤도에 미치는 영향을 검토하기 위해서는 레일의 응력과 체결구의 상향압력 등을 검토할 필요가 있다. 그러나 국내에는 아직까지 접속부를 통과하는 차량의 승차감과 주행안전성, 그리고 궤도에서 레일응력, 체결구 상향압력에 대한 검토기준이 없기 때문에 본 연구에서는 다음과 같은 일본의 기준을 적용하였다.

○ 차체상하진동가속도

주행안전성을 고려한 차체진동 상하가속도(전진폭)의 한도값 이내에서 관리 목표값 2.45m/s²(0.25g)에 편진폭계수(3/4)를 곱한 1.8m/s²을 편진폭 한도값으로 한다. 접속부에서의 구조적인 변경은 상시 존재하기 때문에 궤도틀립과의 경합을 고려하여 접속부에 의해 발생하는 것을 상기 한도치의 70%이하로 제한하여 1.3m/s²을 평가기준치로 정한다.

○ 윤중 감소율

주행안전성을 고려한 윤중감소율 (윤중감소량/정지윤중)은 일본철도구조물 설계표준 변위제한편에 제시된 궤도의 영향이 배제된 구조물만의 변위에 의한 윤중변동을 제한기준인 0.37을 기준으로 검토한다.

○ 레일저부응력

윤중변동 및 지지강성계수의 불균일에 의하여 발생하는 레일응력은 피로를 고려한 60kg장대레일의 한도치를 80MPa를 평가기준치로 정한다.

○ 체결구에 작용하는 상향 압력

접속에서는 지지강성계수의 불균일에 의하여 레일체결장치에 부압(상향 압력)이 작용하는데 이 부압은 레일 체결장치의 체결력을 초월하는 경우가 있으므로 부압을 레일체결장치 체결력의 70%이하로 억제하도록 정한다.

4. 차량-궤도 상호작용 해석

접속슬래브의 길이와 접속슬래브 단부의 처짐량을 매개변수로 하여 교량과 토공 접속부를 통과하는 차량의 승차감과 주행안전성, 그리고 궤도에서 레일의 응력과 체결구에 발생하는 상향압력에 대한 정량적·정성적 특성을 분석하기 위하여 차량-궤도 상호작용을 고려한 수치해석을 수행하였다. 해석결과를 앞절에서 제시한 검토기준과 비교분석함으로써 접속부 통과에 따른 차량과 궤도의 적절한 성능을 확보할 수 있는 접속슬래브의 적정길이와 단부의 처짐한계를 알아보았다.

4.1 해석프로그램 및 해석모델

해석에 사용된 프로그램은 단부의 처짐에 의한 궤도의 변형을 고려할 수 있도록 개발된 차량-궤도 동적상호작용 해석을 위한 전용프로그램을 사용하였으며, 해석에 사용된 차량과 궤도의 모델은 다음 그림 3과 같으며, 해석에 적용된 차량과 궤도의 제원과 물성치는 표1과 같다.

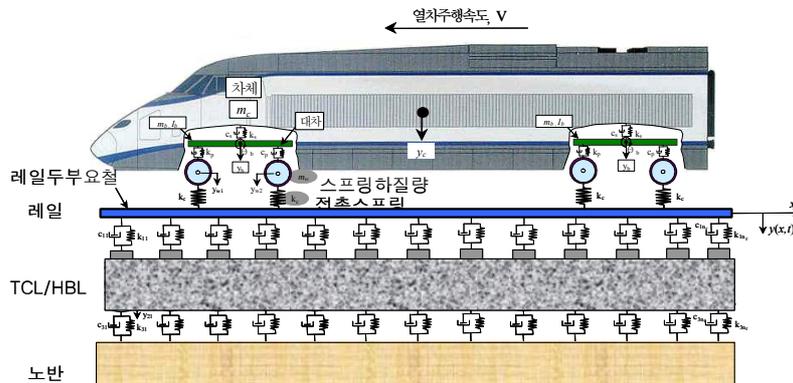


그림 3. 차량/궤도 상호작용 해석모형

표1. 차량/궤도모델의 물성치(궤도 편측당)

차량/궤도모델	물성치	차량/궤도모델	물성치
차체질량(ton)	27.48	차체회전관성모멘트(ton·m ²)	565.95
2차 현가장치 스프링(kN/m)	1.26E3	차륜반경(mm)	430
2차 현가장치 댐핑(kN·s/m)	28.5	레일	UIC60kg
대차질량(kg)	1.21	레일표면반경(mm)	300
1차 현가장치 스프링계수(kN·s/m)	1.252E3	레일 질량(kg/m)	60.3
1차 현가장치 댐핑계수(kN·s/m)	16.0	레일강성도(kN·m ²)	6.42×10 ³
축간거리(m)	3.0	대차간 거리(m)	14.0
스프링하질량(ton)	1.024	레일패드 댐핑계수(kN·s/m)	5.0
침목간격(m)	0.625	레일패드 탄성계수(kN/m ²)	30.0

4.2 해석경우

교량과 토공의 접속부를 통과하는 차량의 거동에 영향을 미치는 요소는 교량의 강성, 레도틀립, 교대부와 토공부의 지지강성차, 접속구간의 길이 및 강성변화도, 접속슬래브의 단부처짐량 등 다양한 요인에 의하여 차량의 거동이 변화하게 된다. 콘크리트케도가 적용된 경우에는 접속구간에서의 레도강성 변화도는 거의 없다고 볼 수 있고, 교량단부에서의 단부처짐각이 설계기준을 만족하고 교대부의 길이가 충분히 길기 때문에 교량단부 통과에 따른 차량의 동요를 무시하는 것으로 가정하였고, 레도틀립의 영향이 배제(3절의 검토기준이 레도틀립의 영향이 배제된 기준임)한 경우를 기본으로 하였다. 이와 같은 가정에 의하여 그림2에서 나타낸 바와 같이 접속슬래브의 길이(L)와 단부처짐량(δ)을 매개변수로 하여 해석을 수행하였다. 해석에 고려된 해석경우는 다음 표2와 같다.

표2. 해석경우

차량속도(km/hr)	슬래브길이, L(m)	단부처짐량, δ (mm)	δ/L 비 (mm/m)	주행방향
350	10	10	1.00	토공->교대
	15	20	1.33	
	20	30	1.50	
	25	40	1.60	교대->토공
	30	50	1.67	
총 50 경우				

5. 해석결과

접속슬래브의 길이와 단부처짐량을 매개변수로 차량-레도 상호작용해석을 수행하여, 차량의 접속부 통과시 승차감을 알아보기 위하여 차량의 차체상하진동가속도를 검토하였고, 차량의 주행안전성을 알아보기 위하여 윤중의 변동률을 분석하여 보았다. 또한 레도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 레일에 발생하는 응력과 상향압력을 분석하여 보았다.

5.1 차체상하진동가속도

그림 4는 접속슬래브의 길이와 단부에서의 처짐량에 따른 통과차량의 차체가속도 변화를 진행방향별로 나타낸 것으로서 단부처짐량과 슬래브의 길이의 비가 클 수록 차체의 상하진동가속도가 크게 발생되어 단부처짐량이 10mm이고 슬래브의 길이가 30m인 경우에 가장 작은 가속도가 발생되며, 반대로 단부처짐량이 50mm이고 슬래브의 길이가 10m인 경우 가장 큰 가속도가 발생됨을 알 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 단부처짐량이 20mm 이상인 경우, 슬래브 길이와 차량의 진행방향에 관계없이 차체상하진동가속도의 기준인 $1.3m/s^2$ 을 초과하는 것을 알 수 있다. 따라서 진동가속도 기준을 만족시키기 위해서는 슬래브의 길이는 가능하면 길게하고 단부의 처짐량은 가능하면 작게하는 것이 필요함을 알 수 있다. 슬래브의 길이와 단부의 처짐량은 시공성과 경제성을 고려하여 한계를 넘지 않는 범위내에서 적절하게 결정할 필요가 있을 것으로 사료된다. 한편 차체진동가속도의 경우, 그림 5에서 알 수 있듯이 차량이 접속구간을 통과한 후 최대값이 발생되며, 차량의 동요에 영향을 미치는 슬래브길이와 단부처짐의 비에 따라 그 크기가 결정되고 차량의 진행방향에 따라 가속도의 방향은 반대지만 최대치는 거의 비슷하게 나타남을 알 수 있다.

5.2 윤중감소율

그림 6은 접속부를 통과하는 차량의 윤중감소율의 변화를 나타낸 것으로 차량이 토공구간에서 교량구간으로 진행하는 경우에 더 크게 발생함을 알 수 있고, 차체상하진동가속도에서와 마찬가지로 단부처짐량과 슬래브 길이의 비가 클 수록 윤중의 감소가 크게 발생함을 알 수 있다. 고려된 해석경우에 대해서는 교량에서 토공으로 진행하는 경우에는 모든 해석경우에 대해서 제한기준을 만족하지만 토공에서 교량으로 진행하는 경우에는 일부조건에 대하여 제한기준을 만족하지 못함을 알 수 있다.

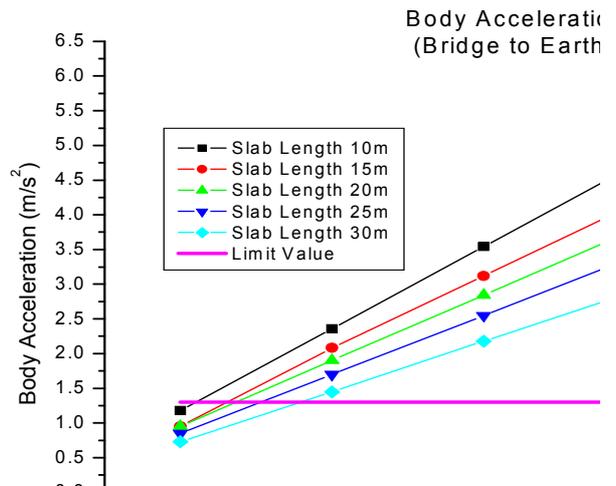
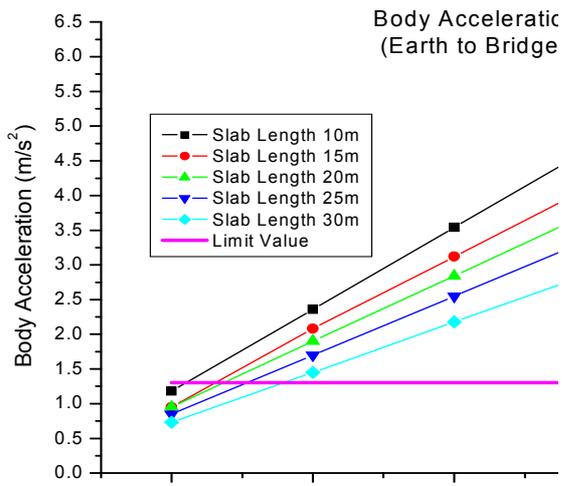


그림 4. 차체상하진동가속도 변화

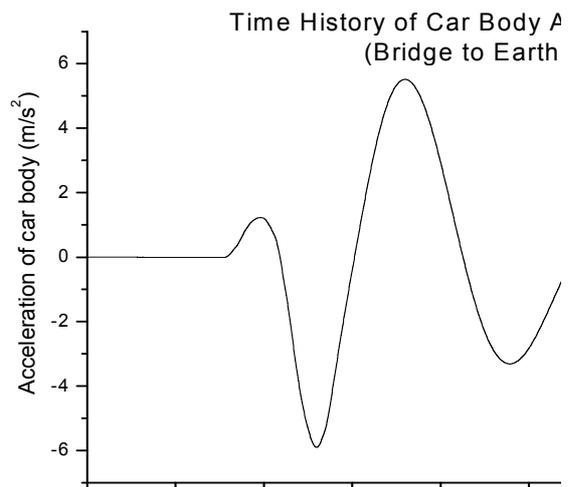
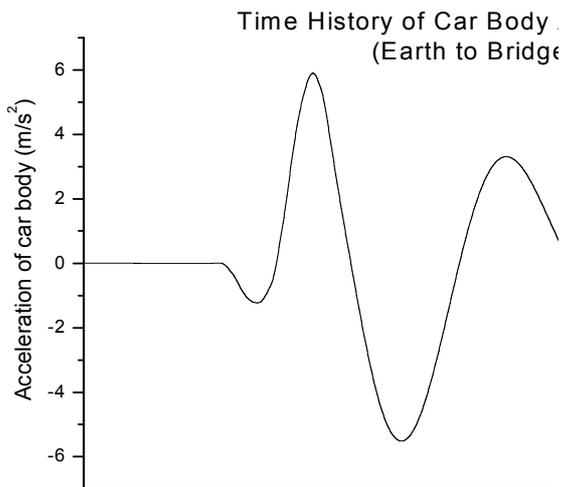


그림 5. 차체상하진동가속도의 시간이력 예

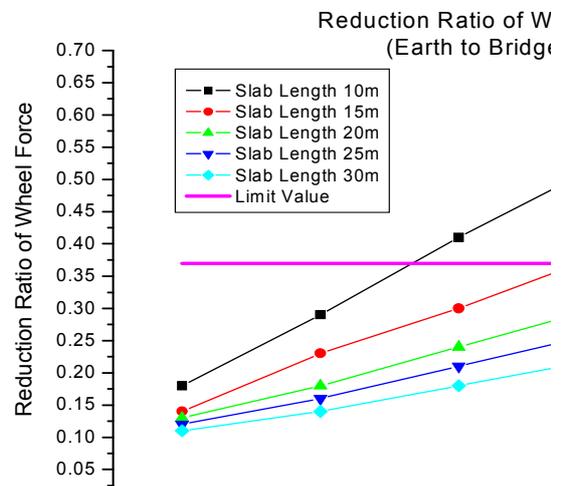
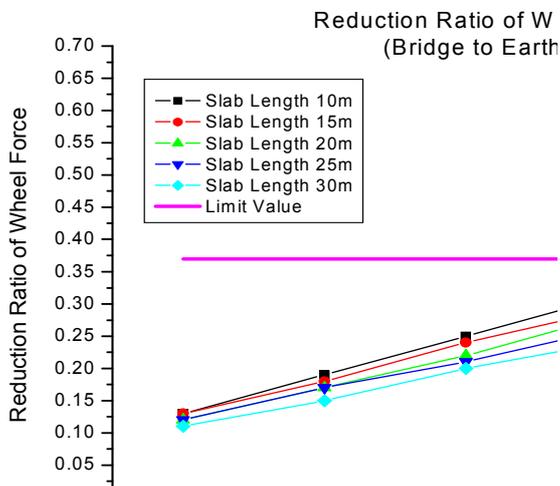


그림 6. 윤중감소율의 변화

5.3 레일저부응력

그림 7은 레일저부응력의 변화를 나타낸 것으로 차량이 교량에서 토공으로 진행할 경우가 토공에서 교량으로 진행할 경우보다 레일 저부에 발생하는 응력이 더 크게 나타나고, 단부의 처짐량과 슬래브길이의 비가 클수록 응력이 크게 발생됨을 알 수 있다. 모든 해석경우에 대하여 발생하는 레일저부응력이 제한값을 넘어서지 않는 것을 알 수 있으므로 레일저부응력이 접속슬래브를 설계를 위한 지배적인 요인이 아닌 것을 알 수 있다.

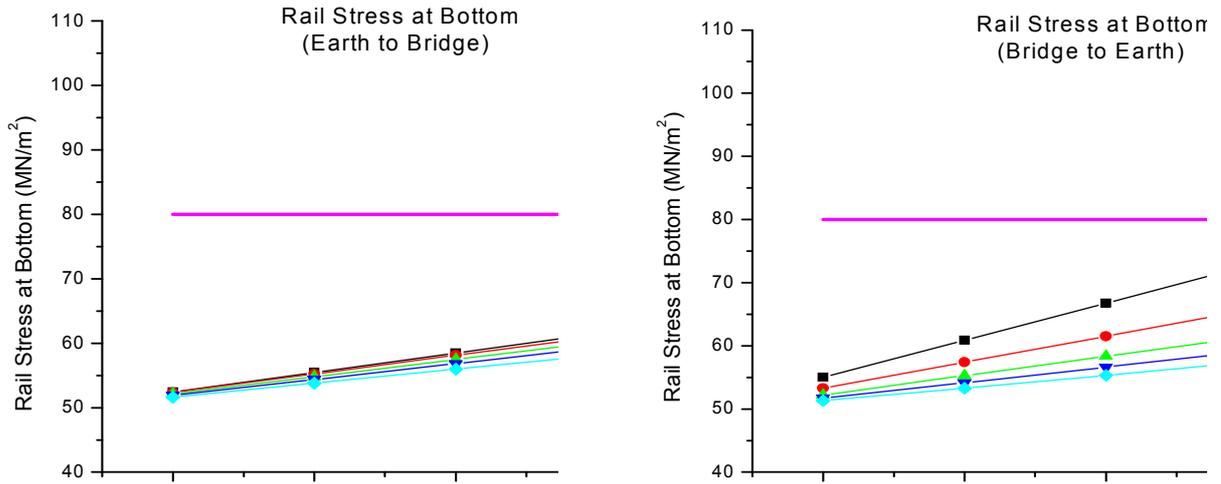


그림 7. 레일저부응력의 변화

5.4 체결구에 작용하는 상향 압력

그림 8은 차량의 접속부 통과시 발생하는 체결구에 발생하는 상향압력의 최대값을 나타낸 것으로서, 단부처짐량과 슬래브의 길이변화에 대하여 큰 차이를 보이지는 않지만 그 비가 클 수록 더 큰 상향압력이 발생됨을 알 수 있다. 또한 차량의 진행방향에 대해서는 큰 차이는 없지만 교량에서 토공방향으로 진행시에 더 큰 값을 발생됨을 알 수 있다. 콘크리트궤도에 사용되는 체결구의 경우 Pandrol SFC인 경우 초기 체결력이 17.2kN, Vossloh system 300-1인 경우 29.0 kN로서 이중 적은 값을 적용하여 70%를 취하면 12kN 정도이다. 따라서 이 값을 기준 값으로 정하면 체결구에 발생하는 상향압력은 모든 경우에 대하여 기준값보다 매우 작게 발생하는 것을 알 수 있어 체결구의 상향압력은 접속슬래브의 설계를 제한하는 조건으로 작용하지 않음을 알 수 있다.

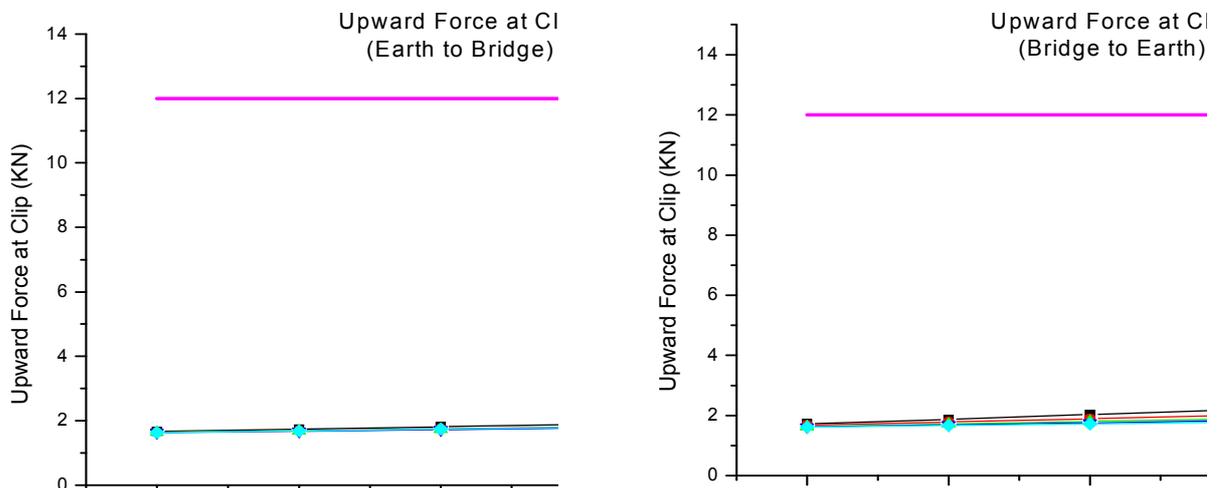


그림 8. 체결구에 발생하는 상향압력의 변화

6. 결론

콘크리트궤도 부설 교량과 토공의 접속부에 부설되는 접속슬래브의 부등처짐 허용한도를 알아보기 위하여 접속슬래브의 길이와 부등처짐량을 매개변수로 하여 차체가속도, 윤중변동률, 레일저부응력 그리고 체결구에 발생하는 상향압력을 분석한 결과, 윤중변동률, 레일저부응력 그리고 체결구에 발생하는 상향압력보다는 차체상하진동가속도가 지배적인 제한기준으로 작용함을 알 수 있었다. 차체상하진동가속도의 경우, 단부처짐량이 20mm 이상인 경우에 슬래브 길이와 차량의 진행방향에 관계없이 차체상하진동가속도의 기준인 1.3m/s^2 을 초과하게 되므로, 차체상하진동가속도 기준을 만족시키기 위해서는 슬래브의 길이는 가능하면 길게하고 단부의 처짐량은 가능하면 작게하는 것이 유리함을 알 수 있었으며, 이때 슬래브의 길이와 단부의 처짐량은 시공성과 경제성을 고려하여 한계를 넘지 않는 범위내에서 적정하게 결정할 필요가 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 石田誠, 三浦重, 河野昭子 (1997) 軌道動的應答モデルとこの解析結果. 鐵道總研報告, Vol.11 No.2, 鐵道總合技術研究所, 日本, pp. 19-26.
2. 철도구조물 등 설계표준·동해설, 변위제한편 (2006), 철도총합기술연구소
3. ERRI D71 (1970) Deformation properties of ballast. *Stresses in the rails, the ballast and in the formation resulting from traffic loads*, RP No.10 Vol.1, European Rail Research Institute, The Netherlands, pp. 27-31.