

교량상 slab궤도의 상향력 민감도분석

Parameteric Analysis for Up-lifting force on Slab track of Bridge

최성기*

박대근**

한상윤***

강영종****

Choi, Sung Ki · Park, Dae Geun · Han, Sang Yoon · Kang, Young Jong

ABSTRACT

The vertical forces in rail fasteners at areas of bridge transitions near the embankment and on the pier will occur due to different deformations of adjoining bridges caused by the trainloads, the settlement of supports, and the temperature gradients. The up-lifting forces is not large problem in the blast track because the elasticity of blast and rail pad buffs up-lifting effect. But, it is likely to be difficult to ensure the serviceability of the railway and the safety of the fastener in the end in that concrete slab track consist of rail, fastener, and track in a single body, delivering directly the up-lifting force to the fastener if the deck is bended because of various load cases, such as the end rotation of the overhang due to the vertical load, the bending of pier due to acceleration/braking force and temperature deviation, the settlement of embankment and pier, the temperature deviation of up-down deck and front-back pier, and the rail deformation due to wheel loads. The analysis of the rail fastener is made to verify the superposed tension forces in the rail fastener due to various load cases, temperature gradients and settlement of supports. The potential critical fasteners with the highest uplift forces are the fastener adjacent to the civil joint. The main influence factors are the geometry of the bridge such as, the beneath length of overhang, relative position of bridge bearing and fastener, deflection of bridge and the vertical spring stiffness of the fastener.

1. 서 론

교량상 궤도는 상호작용에 의하여 레일이 받고있는 축력(인장력 또는 압축력)외에 종방향으로 레일 부가응력과 상판/레일의 상대 절대변위를 추가적으로 발생시켜 궤도의 안정성에 영향을 미친다. 더불어, 상호작용의 영향에 의하여 체결장치에 상향력이 발생하는데, 자갈궤도에서는 단부회전이 있더라도 자갈의 교란으로인한 궤도틀림 발생과 이로 인한 주행안전 및 승차감저하가 있지만 자갈의 탄성이완에 의하여 체결장치에 큰 상향력의 영향을 미치지 못하는 못한다. 하지만 콘크리트 슬래브궤도는 직결궤도로서 레일이 들림으로 인하여 교대 및 교각의 교량단부변형에 의하여 상대적인 단차(lift-off)가 발생하여 수직방향으로 체결장치에 인장력, 즉 상향력을 가하는 효과가 크다. 교량단부 근처의 레일지지점에서 발생하는 최대 상향력이 체결장의 초기체결력을 초과하면 교량단부의 사용성이 떨어지며 레일패드의 이탈가능성이 커지고, 압축력에 대한 저항력이 감소되어 고속주행시 궤도안정성이 떨어진다. 또한 체결장치의 피로 및 파손으로 인한 대형사고가 우려되며 수직틀림에 의하여 체결력이 감소되거나 잃게되면 내구력이 감소 및 종방향 저항력이 감소하여 좌굴강도 또한 작아질 수 있다. 경부고속철도 및 호남고속철도를 비롯하여 최근 철도교량의 고속화, 경전철도입, 적은 유지보수 그리고 미관성등 때문에 콘크리트 슬래브궤도의 사용이 높아지고 있다. 이 경우 교량과 궤도의 상호작용에 의하여 발생하는 교량단부 상향력과 초기체결의 비교검토가 필요한데, 이 비교검토로서 상향력과 구조물 변수간의 민감도 분석으로써, 상판구조물의 제원 및 형식과 교량상부 근처의 체결제 간격을 매개변수로서 변화시켜 그에 따른 상

* 정회원 · 고려대학교 건축 · 사회 환경공학과 석사과정 · E-mail: ildongchoi@korea.ac.kr -발표자

** 정회원 · 고려대학교 건축 · 사회 환경공학과 박사과정 · 공학석사 ktx2136@korea.ac.kr

*** 정회원 · 고려대학교 건축 · 사회 환경공학과 박사과정 · 공학석사 kiss0521@korea.ac.kr

**** 정회원 · 고려대학교 건축 · 사회 환경공학과 교수 · 공학박사 · E-mail: yjkang@korea.ac.kr

향력의 변화양상을 제시하여 콘크리트 슬래브케도 설계시 설계자에게 판단근거를 제시하고자 한다.

2. 본 문

2.1 상향력 초래 가능성

상향력의 초래 가능성에 대한 수식적 증명은 다음과 같다.(그림1)

$$\theta_b = \frac{wa^2}{2} \left(\frac{l}{2EI} \right) - \frac{wl^3}{24EI} = \frac{wl}{24EI} (6a^2 - l^2) \quad (1)$$

$$\delta_A = \frac{wa^4}{8EI} + \theta_b b = \frac{wa}{24EI} (3a^3 + 6a^2l - l^3)$$

상향력이 “0”이 되기 위해서는,

$$3a^3 + 6a^2l - l^3 = 0 \quad (2)$$

$$\therefore a \geq 0.37466 L$$

상판 설계시, 경간이 10m~40m인 경우에는 overhang 길이는 0.3m~1.5m이다. 이것은 “ $a \geq 0.03 L \sim 0.15 L$ ”를 의미한다. 따라서, 상향력은 피할수 없다.

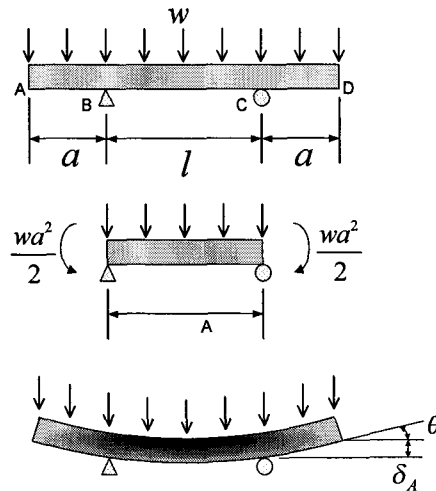


그림1.

2.2 slab케도에서 상향력 발생시 문제점

교대부에서 상판단부가 들림으로써 상판과 직결연결되어있는 slab케도의 레일은 같이올라가지만 교대 토공부는 고정이 되어있어 상대적인 단차(lift-off)가 발생한다. 이 상대적 단차 때문에 수직방향으로 체결장치에 인장력(상향력)을 가하는 효과가 있다. 수직방향의 인장력이 체결장치가 갖고 있는 초기 체결력을 초과하면 케도안전성 및 사용성이 떨어진다. 교각부에서도 상판의 길이가 서로 다르면 상판의 휨 발생시 상판단부의 수직변위의 차이가 생겨 교대부에서처럼 상대적 단차에 의해서 상향력이 발생한다.

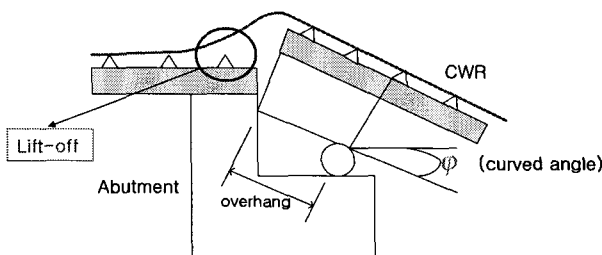


그림2. 교대부

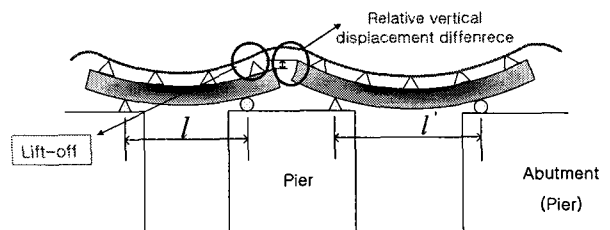


그림3. 교각부

이렇게 교량단부 부근에 체결장치에 상향력이 발생하여 클립의 초기체결력을 초과하면 레일패드의 이탈가능성이 커지고 레일패드 이탈시 압축력에 대한 저항이 감소되어 고속주행의 안정성이 떨어지고 소음·진동문제가 초래될 수 있다. 꺾임각이 크면 궤도재료(체결장치)의 피로 및 파손으로인한 대형사고가 발생할 우려도 있고 수직들림에의하여 체결력이 감소되거나 잃게되면 내구력이 감소 및 종방향 저항력이 감소하여 좌굴강도가 작아질 수 있다. 차량의 속도가 빠르면(고속철도), 동적계수(DS804) 또한 커져 준-동적하중(연직하중)증가에 따른 수직변위(displacement) 및 처짐(deflection)이 증가하고 이로 인한 상향력이 더욱 커진다. 교량단부에서의 수직변위가 Track Irregularity로써 작용하여 차량의 진동에 영향을주어 승차감저하 및 궤도의 동적안정성을 저하 시킬 수 있다. 차량의 과도한 가속도는 차륜/레일의 접촉력을 감소시켜 탈선계수가 증가될 수 있다.

2.3 연구방향

본 연구는 slab궤도 상향력 매개변수 해석으로써 상향력과구조물변수간의민감도분석으로써, 매개변수로는 상판구조물의 제원 및 형식과 교량상부 근처의 체결제간격을 변화시키면서 하중을 작용시켜 초래되는 상향력의 변화양상을 제시하여 콘크리트슬래브궤도 설계시 설계자에게 판단근거제시자 한다.

3. 체일 체결장치의 매개변수 해석

3.1 상향력 초래원인

상향력은 교량상판이 연직하중, 가속/제동하중 그리고 온도변화, 교대나 교각의 침하, 상판의 상하면 온도차, 그리고 축운중에 의한 교량단부의 회전 및 단차에 의해서 발생한다.

표1. 상향력 초래원인

원 인	상판단부변형		체결장치 스프링 계수
	교량단부회전	수직단차	
● 연직하중	○		동적 계수
● 시 ?제동하중		○	
● (축)운중	직접 상향력 초래		정적 계수
● 상판 상하면 온도차	○		
● 교대 ?교각 부등침하		○	
● 교각 전후면 온도차		○	

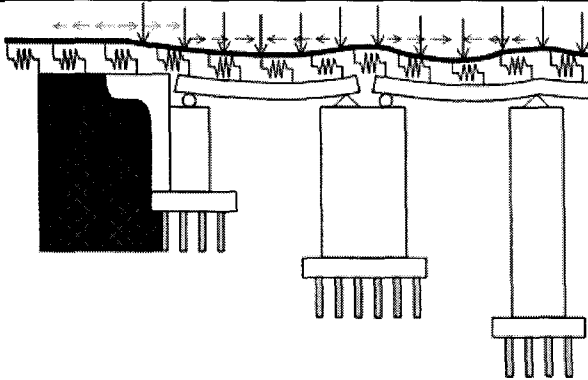


그림 4. 교량단부회전

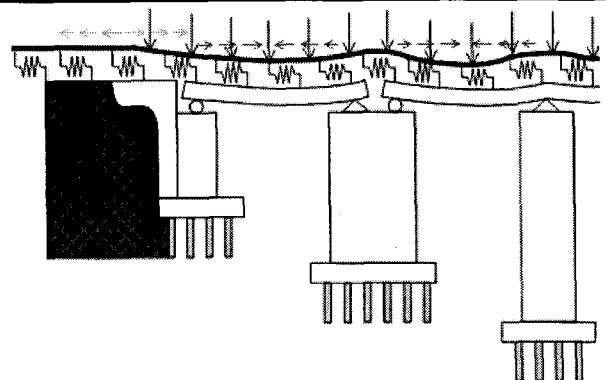
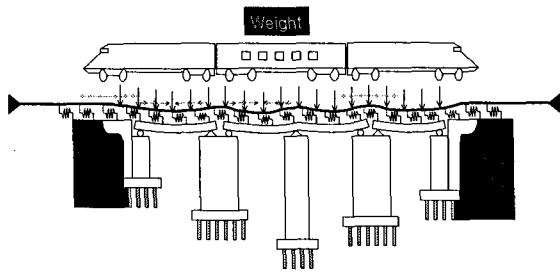
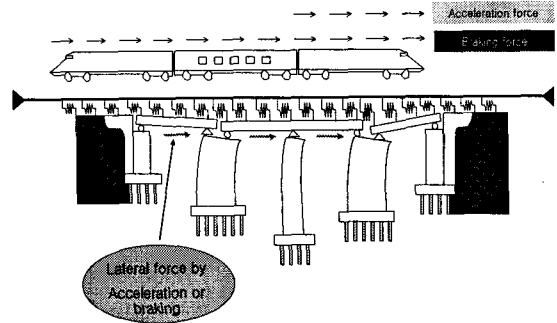


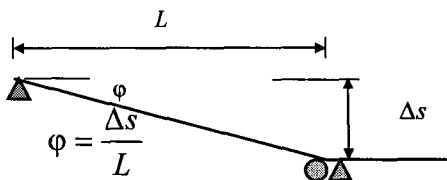
그림 5. 수직단차



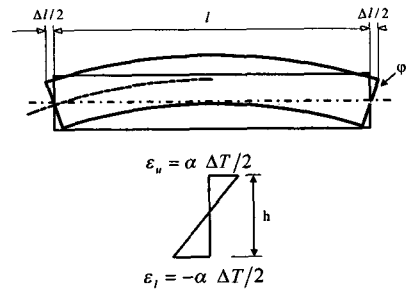
(a) vertical load



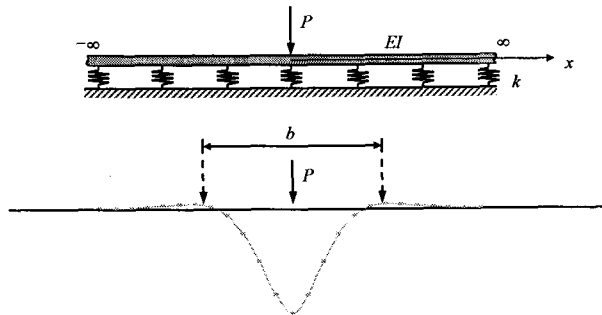
(b) acceleration/braking force



(c) settlement of embankment and pier



(d) temperature deviation of up-down



(e) wheel loads

그림 6. 상향력 초래원인

3.2 목표하는 체결장치

잠재적으로 최대 상향력이 크게 발생하는 체결장치는 그림 6.과 같이 교량단부 근처에서 발생한다.

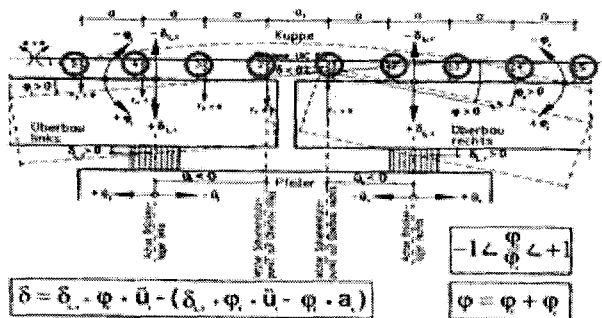


그림 7.

3.3 상향력과 구조물 변수간의 민감도 분석

표2.

작용하중	상판단부변형		스프링 강성	구분	매개변수	
	교량단부회전	수직단차			제한	형식
연직하중	○		동적 계수	상판구조물	제한	교량형식 교좌장치 형식 (탄성받침,포트받침)
상판 상하면 온도차	○		정적 계수		형식	Overhang길이(레일체결장치와 교량받침간의 거리) Span 길이 단순교-연속교
교대 ?교각 부등침하		○		궤도	제한	체결장치 스프링 강성
					형식	교량단부 근처의 체결제 간격 변화

위의 표에 제시한 바와 같이 상판구조물 또는 궤도의 제한 및 형식을 변화시키면서 교량단부에서 발생하는 최대 상향력을 도출하여 매개변수와 최대 상향력간의 관계를 살펴보고자 한다.

3.4 콘크리트 슬래브궤도를 설치한 상부구조물의 단부에서의 사용성 확보

$$\max |F_d| \leq Z_u \quad (3)$$

$\max |F_d|$: 주요 레일지지점에서 측정된 최대 상향력

Z_u : 레일지지점의 초기 체결력
(Vossloh loarv 300 with rail clip Skl 15 =12kN)

3.5 주요 레일지지점에서 측정된 상향력 중첩

$$F_d = \phi_{d,stat} \cdot F(LF1; C_{stat}, a) + \phi_{d,dyn} \cdot F(LF1; C_{dyn}, a) + \delta_{d,stat} \cdot F(LF2; C_{stat}, a) + \delta_{d,dyn} \cdot F(LF2; C_{dyn}, a) + \frac{P_d}{100} \cdot \min F(LF3; C_{dyn}, a) \quad (4)$$

where,

$$\phi_{d,stat} = \sum \gamma_F \cdot \phi_{stat} \quad \phi_{d,dyn} = \sum \gamma_F \cdot \phi_{dyn} \quad P_d = \gamma_F \cdot m \cdot P_1$$

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

γ_F : 부분 안정성 계수(1=작용이 적합할때, >1=작용이 부적할 때)

m : 인접 축하중의 중첩여부에 따른 계수(1=비중첩, 2=중첩)

P_1 : 축윤중

a : 레일지지점의 등거리 간격(mm)

$\phi_{stat}, \delta_{stat}$: static 작용하중에 의한 교량단부에서의 회전각(%) 및 수직 단차(mm)

ϕ_{dyn}, δ_{dyn} : dynamic 작용하중에 의한 교량단부에서의 회전각(%) 및 수직 단차(mm)

C_{stat}, C_{dyn} : 레일지지점의 스프링 강성(kN/mm) - static load(f=0 Hz), dynamic load(f>0 Hz)

$F(LFi; C, a)$: 단위회전변위(1%), 단위수직단차(1mm), 단위 축운중(100kN)에 의해 레일지지점에 발생하는 상향력(kN)

3.6 Model

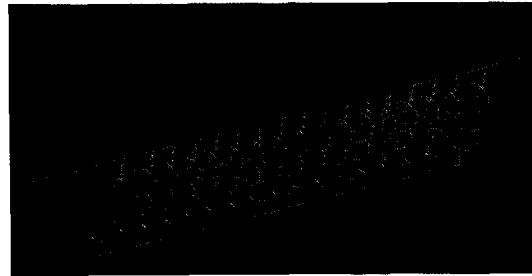
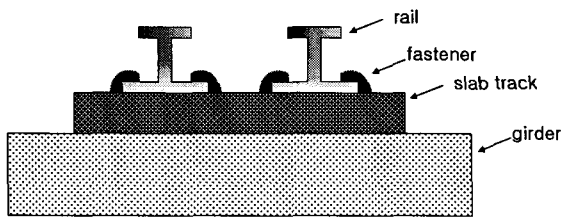


그림 8. slab track model on the girder

거더와 slab케도 시스템간의 상향력 상호작용을 확인하기위해서, 6자유도의 Euler beam인 2종류의 baem으로 구성하였다. 레일은 UIC 60이다. 물성치는 표 3.과같다.

표 3. 레일

property of section				property of material		
Area (2rail)	I_{yy} (2rail)	I_{zz} (2rail)	J	E	G	α
155 (cm ²)	6180 (cm ⁴)	1024 (cm ⁴)	4.34 (cm ³)	2.1×10^8 (kN/m ²)	8×10^7 (kN/m ²)	1.2×10^{-5} (/°C)

표4. 체결제

	강성값
동적하중	60kN/mm
정적하중	31kN/mm

체결장치는 수직 방향 강성 스프링으로 묘사했으며 정적하중계수는 31kN/mm이고 동적하중은 critical값으로써 60kN/mm로 결정하였다.(표4)

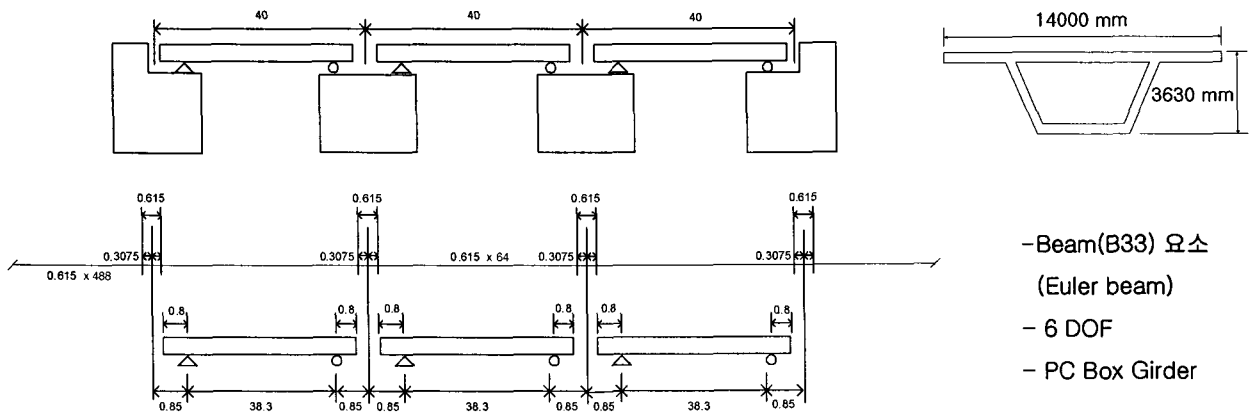


그림 9. 해석 모델

3경간의 단순보로 구성된 교량으로 모델링 했으며, overhang의 길이나 경간의 길이는 위의 그림 9와 같다. 거더의 물성치는 표 5.와 같다.

표4. 거더

Geometry			Property of Section			Property of Material		
span	a	체결장치 등간격	Area	I_{yy}	I_{zz}	E	G	α
40 (m)	0.85 (m)	0.615 (m)	11.9246 (m ²)	19.304 (m ⁴)	134.8 (m ⁴)	0.345×10^8 (kN/m ²)	8×10^7 (kN/m ²)	1.0×10^{-5} (/°C)

4. 해석

4.1 해석과정

해석모델을 바탕으로 ABAQUS6.6-1을 이용하여 교량받침에 단위회전변위(1%)를 적용시킬때 체결장치에 발생하는 단위상향력을 우선 도출하여 매개변수를 바꿔가면서 연직하중(차량하중), 상판상하면온도차, 교대·교각 부등침하를 작용할 때 발생하는 “실제단부회전각” 또는 “실제수직단차”를 산정한다. 실제단부회전각” 또는 “실제수직단차”와 단위값에 따른 체결장치의 발생하는 상향력Table을 바탕으로 실제 발생하는 체결장치의 상향력을 산정한다. 이렇게 구해진 각각의 상향력을 중첩하여 최대 상향력을 찾는다.

4.1 구조해석

아바쿠스 6.6-1을 사용하여 단위회전변위 해석 및 매개변수해석을 수행하였다.

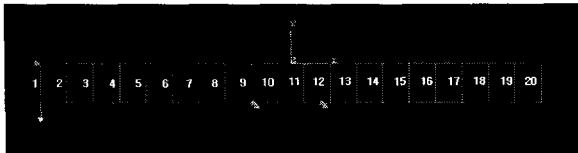
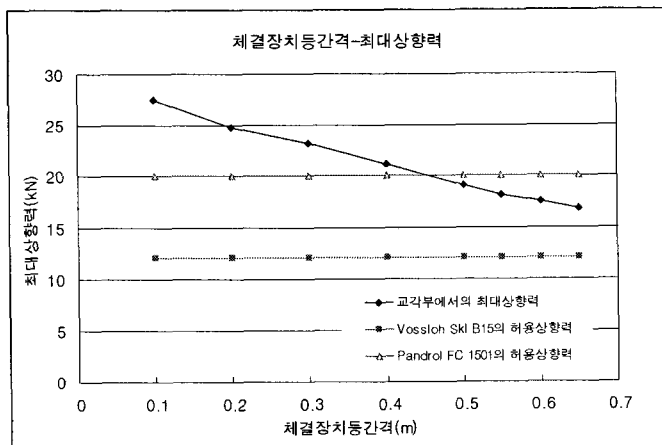


그림 10.

4.2 체결장치 등간격에 따른 교각부에서의 상향력 민감도분석

체결장치간격 (m)	최대상향력 (kN)	Vossloh Skl B15 허용상향력	Pandrol FC 1501 허용상향력
0.1	27.5135	12	20
0.2	24.8328	12	20
0.3	23.233	12	20
0.4	21.1312	12	20
0.5	19.078	12	20
0.55	18.1725	12	20
0.6	17.555	12	20
0.65	16.8349	12	20



5. 결론

체결장치 등간격이 넓어지면 종방향으로 잡아주는 체결장치가 적어짐으로써 들림에 대하여 유연하게 반응하여 체결장치의 간격이 커질수록 발생하는 최대 상향력은 작아진다. 하지만 체결장치 간격이 커질수록 종방향 저항성이 작아짐으로써 좌굴위험성이 높아질 수 있다. 따라서, 체결장치의 간격 결정시, 들림에 대하여 유연하고 종방향에 대한 강도를 확보할 수 있도록 고려해야 한다.

5. 감사의 글

본 연구는 과학기술부 산하 한국과학재단으로부터 국가지정연구실로 지정되어 그로부터 지원을 받아 수행하였다.(No. M10500000119-06J0000-11910)

6. 참고문헌

- [1] Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn, 3. uberarbeitete Auflage, Stand 15.10.1995 (Catalogues for construction of slab track). Deutsche Bahn Gruppe. DB Netz.
- [2] DS 804 (B6) - Sep. 2000, Regulation for bridges and other civil structures, Deutsche Bahn Gruppe, DB Netz("German Railway Code") Appendix 29
- [3] European Rail Research Institute(ERRI D202/DT 362), "Ballast resistance under three-dimensional loading", 1997
- [4] Contract for Service-EXT. No 1 to Task Order No1, Bridge Design Manual (BRDM) Final Report, 1995
- [5] Kerr, A.D. and Accorsi, M.L (1987). "Numerical Validation of The Track Equations for Static Problems." int. J. Mesh. SCI., Vol. 29, No. 1, pp. 15~27
- [6] 김정훈(2006)외etal. "체결장치의수직방향에대한실험적연구", 고려대학교, 철도학회
- [7] 이주현(2006)외etal. "콘크리트도상궤도교량단부상향력해석및적용", 철도기술공사, 철도학회
- [8] Track/bridge interaction recommendation for calculations (UIC Code 774-3 R), 2001
- [9] ABAQUS 6.6-1
- [10] LUSAS V13.8