

슬래브궤도의 콘크리트교량 적용성 검토

Appliance of Slab tracks on the Prestressed Concrete Bridges

김 남 훈* 임 영 수** 신 용 준***
Kim, Nam Hoon Lim, Young Su Shin, Yong Joon

ABSTRACT

The railroad systems with the ballast tracks have been widely used for a long time. But recently, the use of the slab track is being increased gradually with a technical developments. So, this paper deals with the appliance of the slab tracks on the railroad bridges. Firstly, review the design criteria of the railroad bridges related to the slab tracks for the stability and serviceability, based on DIN and EURO code. Then, perform the analysis of the railroad prestressed concrete bridges, and check whether the results of the analysis satisfy the design criteria. Finally, find the construction condition of bridges that all the design criteria are satisfied. As a result, to maintain the stability and serviceability of the bridges, bridges must have some restrictions, including a time of installation of the slab tracks. So, the construction schedule for the erection of the bridges will be carefully considered in case of the concrete railroad bridges with the slab tracks.

1. 서론

철도도상구조는 재료확보가 쉽고, 비용이 저렴하며 보수가 용이한 자갈도상궤도를 주로 사용하였다. 그러나 자갈도상궤도는 열차하중 작용시 자갈층의 소성변형 발생과 열차 통과톤수가 증가하면서 도상 침하누적 등 궤도틀림이 진행될 뿐만 아니라 승차감 악화, 충격하중증가 등에 따라서 선로유지를 위한 지속적인 보수가 필요하다. 또한 열차속도와 축중의 증가로 궤도파괴가 가속화되어 유지보수비용이 증가하여 LCC측면에서도 문제점을 갖고 있다. 따라서 최근에는 초기공사비는 다소 고가이지만 자갈도상궤도의 단점을 해소할 수 있는 슬래브궤도의 적용이 증가되는 추세이다. 슬래브궤도는 자체강성 및 저항력이 커서 열차운행 중 궤도의 변위나 틀림이 자갈도상궤도 적용시보다 상대적으로 감소되어 궤도 보수작업비용 및 시간이 대폭 절감되며, 양호한 선형의 유지로 이용승객들에게 좋은 승차감을 지속적으로 제공할 수 있다. 이에 따라, 해외에서는 고속철도를 중심으로 슬래브궤도의 적용이 증가되고 있으며, 국내에서도 다소 높은 초기투자비와 기술적 뒷받침이 요구됨에도 불구하고 경부고속철도 1단계의 장대터널구간과, 2단계(대구-부산) 전구간에 슬래브궤도가 적용되고 있다. 또한 일반 철도구간에도 슬래브궤도의 점차적인 적용 확대가 예상되고 있으나 슬래브궤도를 적용하는 교량을 설계하기 위한 국내기준이 구체적으로 제시되지 않고 있으며, 해외의 기준들도 부분적으로 산재해 있어 설계 적용에 많은 혼란과 어려움이 따르는 실정이다. 이에 본 논문에서는 국내 고속철도에 적용되고 있는 독일 RHEDA사의 궤도시스템을 근간으로 슬래브궤도를 적용하는 교량설계를 위한 기준을 검토하고 경제성 및 시공성이 우수하여 철도교 중 가장 일반적으로 적용되는 교량형식인 P.S.C.빔교와 최근 적용빈도가 늘어나고 있는 P.S.C. U거터교를 중심으로 슬래브궤도의 적용성을 고찰코자 한다.

* (주)서영엔지니어링 철도설계실 상무, 정회원 E-mail : nhk@seoyeong.co.kr

TEL : (02)589-4273 FAX : (02)589-4270

** (주)서영엔지니어링 철도설계실 전무, 정회원

*** (주)서영엔지니어링 철도설계실 차장, 비회원

2. 슬래브케도 적용 설계기준

2.1 적용범위

운행하는 열차와 교량의 상호작용, 슬래브케도와 교량의 상호작용은 각각 독립적인 거동으로 간주할 수 있으므로 교량구간 슬래브케도의 적용성은 각 상호작용을 구분하여 검토할 수 있다.

도표 1. 해석 방법 구분

구분	해석 방법
열차-교량 상호작용 해석	교량구조해석 : 정해석 및 동해석 (교량의 처짐, 단부 처짐각)
슬래브케도-교량 상호 작용 해석	CWR 해석

도표1에서와 같이 기본적으로 열차-교량 상호작용해석은 슬래브케도의 제원과 무관하게 슬래브케도를 통하여 교량에 전달되는 열차주행하중에 따른 교량구조물의 해석과정이고, 슬래브케도-교량 상호작용 해석은 슬래브케도의 재원 및 특성이 직접적인 영향인자가 되는 온도변화, 가감속하중에 따른 슬래브케도와 교량의 상호작용을 산출하는 과정을 의미한다. 상기 해석들은 독립적으로 수행될 수 있으므로 여기서는 슬래브케도와 교량의 상호작용은 논외로 하고 향후 슬래브케도의 적용에 무리가 없도록 적절한 교량설계를 위한 기준을 검토하고 그에 따라 각 교량형식별로 교량설계를 수행하였다.

기준 검토시 슬래브케도시스템을 개발하여 실용화한 독일, 일본, 이탈리아의 시스템 중 우리나라 고속철도에 적용·시공중에 있는 독일 RHEDA사의 슬래브케도시스템을 근간으로 독일/유럽기준을 검토하였다.

2.2 처짐 관련기준

2.2.1 장기연직처짐 (AKFF 4th ed.)

크라이프와 건조수축에 의한 장기연직처짐은 $L/5,000$ 보다 작아야 한다. (L : 교량경간장)

이 기준은 경부고속철도레도보고서^[8]에도 명기되어 있으며 슬래브케도 부설 후 발생하는 교량상판의 장기연직처짐 허용범위를 규정하는 항목으로 슬래브케도의 안정성 및 유지 보수 빈도에 직접적인 영향을 미치므로 장기처짐을 피할수 없는 콘크리트 교량의 경우 처짐량을 최소화하기 위하여 시공조건을 고려한 면밀한 검토가 요구된다.

2.2.2 활하중에 의한 처짐 (DIN Fachbericht 101)

활하중 작용시의 총처짐 허용값은 교량연장 및 열차운행속도의 함수이며 그림1 과 같다. 이 규정은 슬래브케도와 자갈도상케도에 모두 적용되는 기준으로, 철도설계기준의 경간 중앙부 수직처짐 기준 (도표2)과 비교하면 지간에 따라 차이는 있지만 상대적으로 큰 허용값을 나타내는데 철도설계기준은 장기처짐을 포함하지 않은 활하중에 의한 처짐 기준이므로 두기준의 실제 허용값은 큰 차이가 없다고 판단된다.

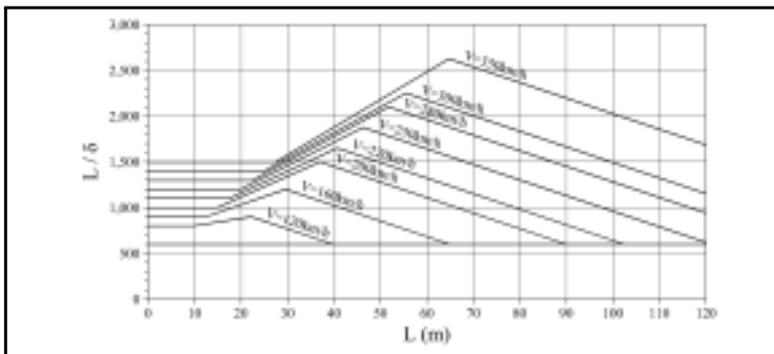


그림1. 허용 총처짐량 산정기준[DIN]

도표 2. 연직처짐기준[철도설계기준]

V(km/h) \ L(m)	L(m)	
	$0 < L < 50$	$L \geq 50$
$V \leq 120$	$L/800$	$L/700$
$120 < V \leq 150$	$L/1100$	$L/900$
$150 < V \leq 200$	$L/1600$	

※ $L/1700$: 고속철도 기준

그림1의 허용값은 3경간이상의 단순교로 구성된 교량에 해당되며, 1~2경간의 단순교 및 연속교의 경우는 그림1의 허용값에 0.7을 곱하여 사용하고, 3경간이상의 연속교에는 0.9를 곱하여 사용한다.

이 기준은 열차운행시 승객의 승차감을 적정수준으로 유지하기 위한 규정으로 여기서의 총처짐량은 크리이프와 건조수축, 활하중에 의한 처짐을 모두 포함하는 값이며, 목표하는 승차감 수준에 따라 도표3의 처짐제한계수를 총처짐 허용값에 곱하여 사용한다. 본 논문에서는 검토 교량들이 단순 프리스트레스트 교로서 그 특성상 크리이프와 건조수축에 의한 장기처짐과 활하중에 의한 처짐이 서로 상쇄되는 방향으로 발생함에 따라 기준의 취지에 부합하도록 활하중에 의한 처짐만을 검토하였다.

도표 3. 승차감수준에 따른 처짐제한계수

승차감 수준	처 짐 제 한 계 수
매우 좋음 (very good)	1.0
좋음 (good)	1.3
보 통 (acceptable)	2.0

도표 4. 체결구 종류별 허용 상향력

구 분	허용 상향력(kN)
Vossloh IOARV 300 fastening system	12.0
Modified BWG ERL fastener	27.0

2.2.3 단부 회전각 기준(Betonkalender 2000)

슬래브레도에서 단부회전각은 교대에서 2%, 교각에서 1%기준을 만족하여야 한다. 이 기준은 슬래브레도에 발생하는 상향력과 연직방향 변형을 최소화하기 위한 규정으로 단순보의 양단부가 설치되는 교각은 양 단순보의 회전에 따른 슬래브 레도의 부담이 교대부보다 커지므로 회전각 허용값을 교대 허용값의 반으로 제한하였다. 경부고속철도레도보고서^[8]의 경우에는 복선교량 기준으로 0.003rad. 이내로 상판의 회전각변위를 제한하고 있다.

2.3 상향력 기준(DS 804)

교량과 슬래브레도 연결부에서 발생하는 상향력은 교좌장치와 슬래브 레도 체결구의 상대위치에 따라 영향을 받으며, 교량거더의 연직처짐 및 단부회전각, 교량 종방향 수평하중에 의한 교각의 변형 등에 기인한 레도와 교량 상판의 변위차에 의해 발생하며, RHEDA 시스템에 적용되는 체결구의 종류에 따른 상향력 허용기준은 도표4와 같다.

2.4 동적 기준 (EN code 1990)

열차운행에 따른 슬래브레도의 연직가속도는 5.5m/s²으로 제한된다. 이 규정은 승차감에 대한 동적기준으로 일반적으로 2.2.2의 열차운행에 따른 승차감 기준이 동적기준보다 엄격하므로, 승차감기준을 만족할 경우 동적기준의 검토는 필요치 않다.

2.5 적용 설계기준

슬래브레도 교량설계를 위한 주요적용기준은 도표5와 같으며 이중에서 실질적으로 구조형식결정에 영향을 미치는 중앙부 장기연직처짐 및 총처짐(활하중), 단부회전각(활하중)에 대한 검토를 수행하여 슬래브레도 적용시 교량형식별 적정성을 검토하였다.

도표 5. 적용 설계기준 요약표

구 분		기 준		구 분	기 준
활하중	단부 회전각	교대부 회전각 : 2% 교각부 회전각 : 1%		크리이프와 건조수축에 의한 중앙부 연직처짐	L/5000, L:교량경간장
	중앙부 연직 처짐	열차속도:200km/h기준, L:교량경간장			
		경간장(m)	처짐제한	동적기준	연직가속도 제한 : 5.5 m/sec ²
		0~15.0m	L/1500		
		15.0~37.0m	L/(659+22.73 · L)		
37.0~90.0m	L/(2129-17 · L)				

3. 슬래브궤도 제원

RHEDA사의 슬래브궤도시스템에 적용되는 교량상의 슬래브궤도는 그림2와 같이 구성된다.

3.1 콘크리트 슬래브

콘크리트 도상을 직접 지지하는 교량의 상판슬래브를 의미한다.

3.2 P.C.L.(Protective Concrete Layer)

교량 상판슬래브의 방수층을 보호하기 위한 콘크리트층으로 콘크리트 슬래브에 방수를 시행한 후, 방수층 위에 설치한다.

3.3 T.C.L.(Track Concrete Layer)

P.C.L.상부에 설치되어 궤도에 전달되는 하중이 직접 작용되며 열차운행 및 온도변화 등으로 궤도에 전달되는 연직 및 수평하중을 교량으로 전달해주는 역할을 한다.

3.4 Cam Plate

P.C.L.과 T.C.L.사이에는 Cam Plate가 설치되고, 상부의 수평력은 Cam Plate를 통하여 교량에 전달된다. Cam Plate에는 수평력에 대한 완충작용을 하는 완충재를 벽면에 설치한다.

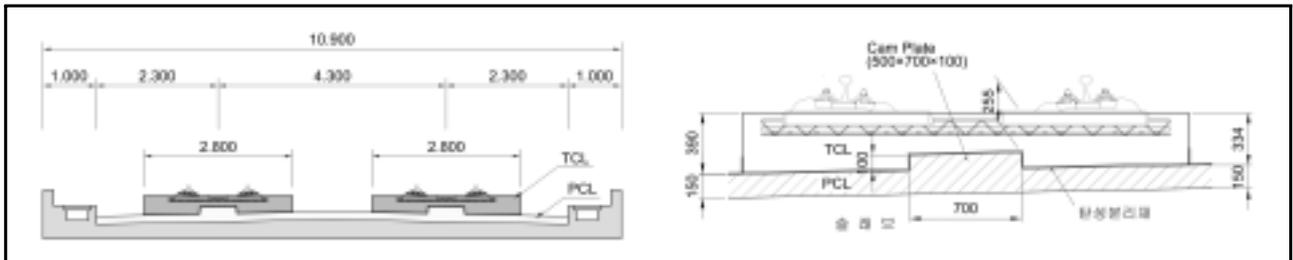


그림2. 교량상 슬래브궤도 단면제원

4. 구조 해석

4.1 구조해석 개요

슬래브궤도 시스템 도입에 따른 콘크리트 교량의 적용성을 검토하기 위하여 슬래브궤도 자중을 포함하는 사하중과 LS22 표준활하중을 적용, 구조해석을 수행하고 설계기준의 충족여부를 확인하였다. 해석시 시공일정을 고려하고 특히 슬래브궤도의 설치시기를 구분, 각 시기별 장기거동해석을 통한 장기처짐 검토로 시공일정에 따른 교량의 적정성을 검토하였다. P.S.C.빔교는 일반적으로 철도교에서 사용하는 자갈도상 적용단면과 동일한 25m 경간장을 기준하였으며, P.S.C.U거터교는 30m 경간장으로 계획하였다. 그 단면제원은 그림3과 같다.

4.2 해석 적용 가정

해석시 적용된 가정은 아래와 같다.

- T.C.L. 및 P.C.L.층은 강성을 무시하고 하중으로만 고려하였다.
- P.C.L. 및 T.C.L.층의 설치시기차이에 따른 장기처짐의 변화량은 미미하므로 동일하게 가정하였다.
- 상부슬래브는 양생이후의 합성거동을 고려하였다.
- 장기거동 해석시 크리이프 및 건조수축량 산정을 위해 CEB-FIP 및 ACI모델을 각각 적용하였다.
- 검토교량은 단경간이 연속되는 교량으로 가정하여, 단부허용회전각은 교각부 기준을 적용하였으며 승차감 수준은 ' 좋음'으로 설정하였다.

4.3 사용프로그램 및 해석 모형

해석은 MIDAS CIVIL을 사용하여 수행하였으며, 해석모형은 그림3과 같다.

구분	단면제원	구조해석 모형
P.S.C. 빔교 L=25.0m		
P.S.C. U거더교 L=30.0m		

그림3. 단면제원 및 구조해석 모형(복선기준)

4.4 교량 형식별 작업 일정

장기연직처짐의 검토를 위하여 도표6과 같이 공정별 작업일정을 가정하여 장기거동해석을 수행하였다. 공정별 작업일정은 각 교량형식별 최소가설일정을 도출하기 위해 이론적으로 가능한 최소작업일정을 산정하였으며, P.C.L. 및 T.C.L.설치일을 슬래브 및 가로보 타설후 29일, 90일, 180일, 360일의 4개 일정으로 각각 검토하였다.

P.S.C. 빔교	0일	7일	28일	56(28)일	해석 1 : 57(29)일 해석 2 : 118(90)일 해석 3 : 208(180)일 해석 4 : 388(360)일	10,000일	
	거대 타설	1차 긴장력 도입	슬래브 및 가로보 타설	공동구 설치	PCL 및 TCL 설치	크리프 및 건조수축 종료	
P.S.C. U거더교	0일	7일	28일	35일	56(28)일	해석 1 : 57(29)일 해석 2 : 118(90)일 해석 3 : 208(180)일 해석 4 : 388(360)일	10,000일
	거대 타설	1차 긴장력 도입	슬래브 및 가로보 타설	2차 긴장력 도입	공동구 설치 및 3차 긴장력 도입	PCL 및 TCL 설치	크리프 및 건조수축 종료

※ () : 슬래브 및 가로보 타설이후부터의 경과일자

도표 6. 교량 공정별 작업일정

5. 해석결과분석

5.1. 해석결과

5.1.1 장기처짐

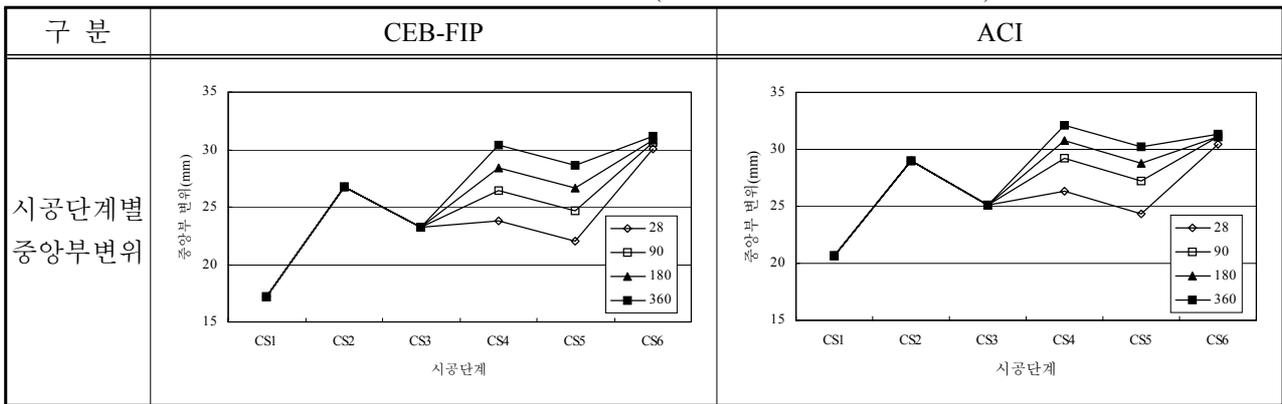
장기처짐의 해석결과는 도표7, 8, 9와 같다.

도표 7. 해석결과(TCL설치이후의 장기처짐 비교)

해석구분		TCL시공일정별 TCL설치이후의 장기처짐(mm)					기준(mm)
		57(29)일	118(90)일	208(180)일	388(360)일	기준일	
P.S.C. 빔교	CEB-FIP	8.05	5.94	4.18	2.52	4.66(150일)	4.80
	ACI	6.14	3.86	2.28	1.12	4.79(60일)	
P.S.C. U거더교	CEB-FIP	13.89	9.20	6.62	4.28	5.45(225일)	5.68
	ACI	9.39	4.50	2.26	0.63	5.65(63일)	

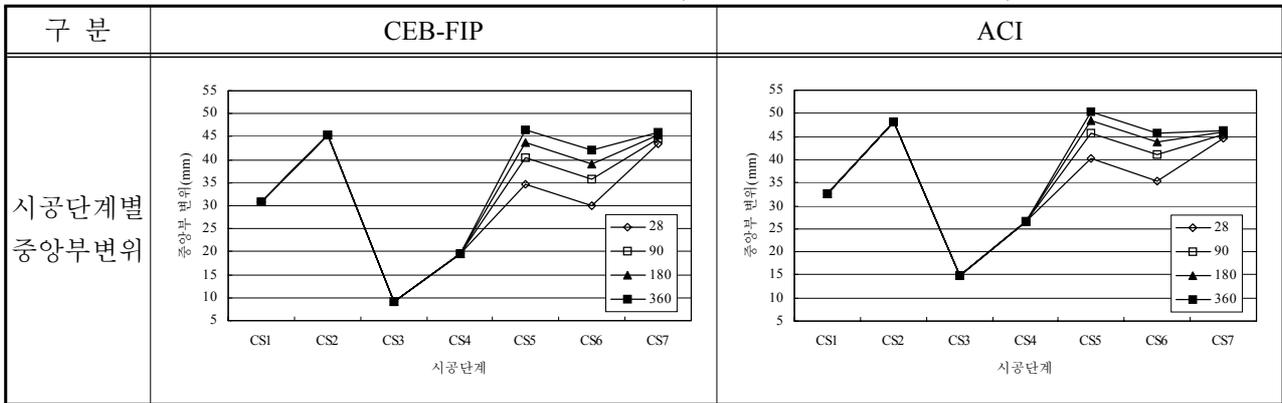
※ () : 슬래브 및 가로보 타설이후부터의 경과일자, 기준일 : 기준을 만족하는 최소 일정

도표 8. P.S.C.빔교 해석결과 (시공단계별 장기처짐 비교)



※ 여기서, CS1 : 프리스트레싱 직전 CS2 : 바닥슬래브 타설 직전 CS3 : 바닥슬래브 타설 직후
CS4 : 트랙타설 직전 CS5 : 트랙타설 직후 CS6 : 10000일 후 처짐 수렴

도표 9. P.S.C.U거더교 해석결과 (시공단계별 장기처짐 비교)



※ 여기서, CS1 : 1차 프리스트레싱 직후 CS2 : 바닥슬래브 타설 직전 CS3 : 바닥슬래브 타설 직후
CS4 : 2차 프리스트레싱 직후 CS5 : 2차 고정하중 재하 및 3차 프리스트레싱 직후
CS6 : 트랙타설후 CS7 : 10000일 후 처짐 수렴

5.1.2 중앙부 총처짐 및 단부회전각

중앙부 총처짐 및 단부회전각의 해석결과는 도표10과 같다.

도표10. 해석결과 (중앙부 처짐 및 단부회전각 비교)

구분	활하중 처짐(mm)	허용 처짐(mm)	단부 회전각(%)	허용 회전각(%)
P.S.C.빔교	5.01	19.3	0.685	1.0
P.S.C.U거더교	13.88	22.4	1.560	1.0

5.2 해석결과 분석

TCL시공시기를 달리한 해석결과를 아래와 같이 분석하였다.

- 1) 중앙부 활하중처짐은 각 교량형식 모두 기준치 이하로 나타났다. 단부회전각의 경우 P.S.C.빔은 기준을 만족하였고, P.S.C.U거더교는 교대기준은 만족이 되나 교각기준은 만족하지 못하였지만 경부고속철도 궤도공사 실시설계보고서의 허용기준인 0.003rad.보다는 작았다.
- 2) CEB-FIP와 ACI모델 적용에 따른 장기거동 해석결과는 CEB-FIP모델 적용시가 ACI모델 적용시에 비하여 상대적으로 큰 장기변형이 발생하였으며, 그 차이는 T.C.L.설치시기가 늦어질수록 더 커지는 경향을 보였다.
- 3) 국내 장기처짐기준이 CEB-FIP 모델을 기반으로 하고 있으며 그 결과가 ACI모델에 비하여 안전측이므로 CEB-FIP 모델에 의한 해석결과로 기준 만족여부를 검토하였으며, 그 결과 P.S.C.빔교의 경우 장기허용처짐을 만족하기 위하여 슬래브 타설 이후부터 T.C.L.시공시까지 최소 150일이상의 기간이 필요하였다.
- 4) P.S.C.U거더교의 경우, 장기허용처짐을 만족하기 위하여 슬래브 타설 이후부터 T.C.L.시공시까지 최소 225일이상의 기간이 필요하였다.

6. 결 론

검토결과와 같이 콘크리트 교량에 슬래브궤도를 적용할 경우, 설계기준을 충족시키기 위한 단면제원 등은 자갈도상궤도 적용시와 큰 차이가 없는 것으로 판단되었으나, 슬래브궤도의 안정성 확보를 위한 장기 허용처짐기준의 만족을 위해서는 T.C.L.시공시기의 조정이 필요한 것으로 나타났다. 슬래브궤도의 안정성은 향후 궤도 및 도상의 유지·보수와 직접 관련되므로 설계 및 시공시 장기처짐의 영향은 반드시 고려되어야 한다, 따라서 교량구간에 슬래브궤도를 적용할 경우 설계시에는 장기거동해석을 통하여 TCL의 설치시기를 결정하여야 하며, 시공시에는 이를 감안하여 전체 공정에 차질이 없도록 시공 계획을 수립하여야 한다. 또한 모형실험 및 향후 교량 시공시 실제측에 의한 데이터확보로 보다 정확한 장기처짐의 예측을 위한 연구가 필요하며, 콘크리트 도상 적용시의 국내설계기준을 명시화하여 새로운 기술 도입에 따른 혼란을 막고 효율적인 설계 및 시공이 이루어질 수 있도록 하여야 할 것이다.

참고문헌

1. AKFF 4th ed. (8. 2002), Code for the Construction of the solid slab track of the German Railways (Deutsche Bahn Gruppe.)
2. DIN Fachbericht 101 (3. 2003), General Impacts on Bridges(Highway bridges, bridges for passengers, bicycle riders and railway bridges) Beuth Berlin
3. Betonkalender 2000 (2000), Slab tracks for railroads. Ernst & Sohn, Berlin
4. DS804 (B6) (9. 2000), Regulations for bridges and other civil structures. Deutsche Bahn Gruppe.
5. EN1990 (10. 2002), Basis of Structural Design. Beuth Berlin
6. 철도설계기준[철도교편] (2004), 대한토목학회
7. 고속철도 설계기준 (2004), 한국철도시설공단
8. 경부 고속철도 대구-부산간 궤도공사 실시설계 보고서 (2006), 한국철도시설공단