콘크리트궤도 부설 교량의 단부 사용성 검토를 위한 매개변수 연구

The Parameter Study of Serviceability Review of End Track on Railway Bridge installed Concrete Slab Track

성덕룡* 김영하** 박용걸*** 김성일****

Sung, Deok-Yong Kim, Young-Ha Park, Yong-Gul Kim, Sung-Il

ABSTRACT

Construction of concrete slab track is trending to increase gradually in national and international for reduction in track maintenance cost and secure of ride comfort. However, in case of railway bridge installed concrete slab track, the serviceability review of end deck should be performed for reducing the maintenance cost of track. The serviceability review of track contains that the compression force which is occurred on fastener of end bridge should be smaller than the compression force causing the deformation limit of elastic pad and the uplift force which is occurred on fastener of end abutment should be smaller than initial fastening force.

Therefore, this study calculated the deflection and end rotation of the railway bridge according to the span length and stiffness of railway bridge and estimated the compression force and uplift force which are occurred on the track of end bridge using the finite element method. This study indicated the several diagrams that are contained the correlation between the behaviour of the track and the behaviour of the railway bridge. As a result, to reduce the end rotation of the railway bridge is very efficient to increase the height of railway deck.

key words : concrete slab track(콘크리트궤도), railway bridge(철도교), end deck(단부), serviceability(사용성), compression force(압축력), uplift force(압상력)

1. 서 론

국내·외에서 궤도유지관리비용 저감 및 안정적인 승차감 확보를 위해 콘크리트슬래브궤도 부설이 늘어나고 있는 추세이다. 그러나 콘크리트궤도 부설교량의 경우에는 유지보수비용 저감측면에서의 단부 사용성 검토를 수행하도록 되어 있다. 단부 사용성 검토에서는 교량부 체결장치에서 발생하는 압축력에 의한 탄성패드의 변형한계를 검토하여야 하고, 교대부 체결장치에서는 압상력에 의한 체결력 한계를 검토하여 사용성을 평가하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 정·동적 작용력에 의한 교량의 처짐 및 단부회전각을 검토하여 교량의 단부 회전각에 영향을 미치는 주요인자들을 검토하였다.

* 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 박사수료, 정회원
E-mail : dysung@snut.ac.kr
TEL : (02)970-6575 FAX : (02)971-6575
** 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정, 한국철도시설공단 건설본부 장항선PM 파트장, 정회원
*** 서울산업대학교 철도전문대학원 교수, 정회원
**** 한국철도기술연구원 철도시스템연구센터 철도구조연구실 선임연구원, 정회원

2. 콘크리트궤도 부설 교량의 사용성 확보를 위한 단부회전각 제한기준[4]

2.1 검토방법

교량 상판 단부에서의 콘크리트궤도의 사용성을 보장하기 위해서는 교량 상판 단부의 회전 및 단차로 인해 레일 지지점의 체결장치에 발생하는 수직하중은 체결장치의 탄성지지체와 앵커시스템에서 공용기간 동안 아무런 손상없이 충분히 흡수할 수 있어야 하며, 레일에 부가적으로 발생하는 휨응력은 한계치를 초과해서는 안된다. 콘크리트궤도가 부설된 단부 변형과 이에 따른 체결장치 작용력에 대한 검증은 다음과 같이 실시한다.

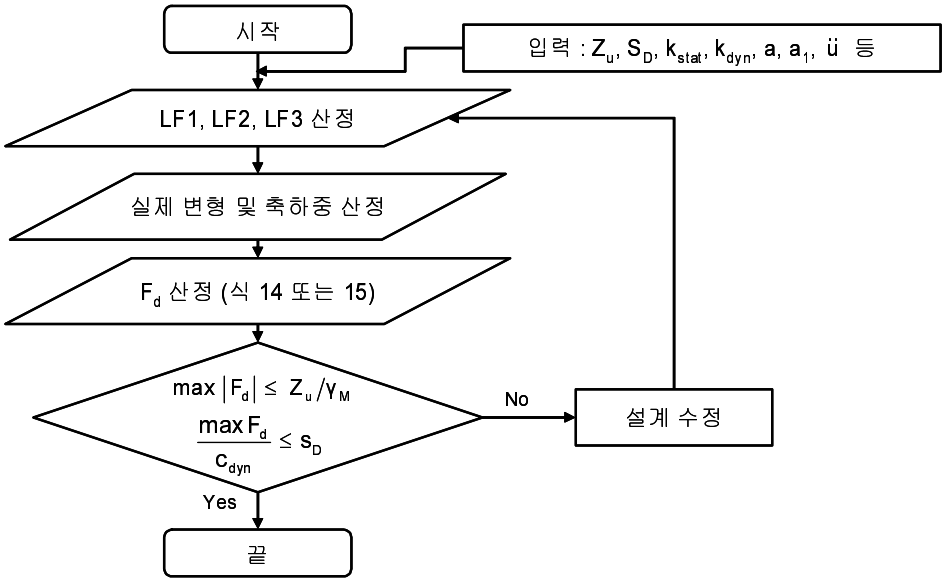


그림 1. 체결장치 작용력의 산정 및 검토 절차

여기서, F_d : 체결장치 작용력 설계값

Z_u : 레일 지지점 부상력의 허용값, 즉 체결장치 초기 체결력

$F(LF1; k_{stat} \text{ or } k_{dyn}, a, a_1)$: 단위 단부회전(ϕ=1‰)에 의한 체결장치 작용력

$F(LF2; k_{stat} \text{ or } k_{dyn}, a, a_1)$: 단위 단차(δ=1mm)에 의한 체결장치 작용력

$F(LF3; k_{dyn}, a)$: 단위 축하중(100kN)에 의한 체결장치 직접 작용력

k_{stat}, k_{dyn} : 레일 지지점 정적 또는 동적 연직 스프링계수

a : 일반 구간의 레일 지지간격 (등간격), a_1 : 교량 상부구조 연결부의 레일 지지간격

γ_F : 부분안전계수 (표 1. 참조), γ_M : 레일지지점 저항에 관한 안전계수, 일반적인 경우 γ_M=1.0

ϕ_{stat} : 정적 작용에 의한 단부 회전각의 계산값, ϕ_{dyn} : 동적 작용에 의한 단부 회전각의 계산값

δ_{stat} : 정적 작용에 의한 단차의 계산값, δ_{dyn}: 동적 작용에 의한 단차의 계산값

P : 축하중

m : 인접 축하중의 영향을 고려하기 위한 계수

$b \approx$ 축간거리(d)인 경우, m = 2

$b \neq$ 축간거리(d)인 경우, m = 1

ϕ_d, δ_d, P_d : 단부회전, 단차 및 축하중의 계산값에 부분안전계수를 곱한 설계값

s_D : 레일체결장치 탄성패드의 연직 변형한계, α : 열차속도에 관한 계수

$V <$ 60km/h인 경우, α = 1.0 , $V \ge$ 60km/h인 경우, α = 0.8

k_{dyn} : 압축력에 대한 검토에 있어서 동적 스프링계수는 안전측의 검토를 위해 정적 스프링계수(f=0, k_{stat})와 동일하게 가정한다.

표 1. 부분안전계수

구분	작용력	부분안전계수 (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

2.2 정 · 동적 작용력

교량 상부구조의 변형을 일으키는 작용으로는 다음과 같은 요소를 고려하여야 한다.

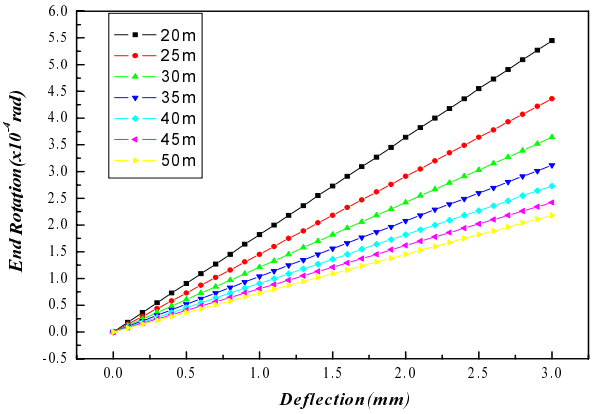
1) 정적 작용
 가) 단부회전
  ① 교량 및 궤도의 자중 및 크리프와 건조수축의 영향
  ② 교량 상부구조의 상하면 온도차 ③ 교각 기초의 잔류 부등침하
 나) 단차
  ① 레일과 교량 상부구조의 온도차에 의한 교각 상부 회전
  ② 교각 전후면 온도차에 의한 교각 상부 회전
2) 동적 작용
 가) 단부회전 : ① 열차 수직하중
 나) 단차
  ① 시·제동하중에 의한 교각 상부 회전
  ② 열차 수직하중에 의한 탄성받침에서의 연직 변형
 다) 축하중에 의한 직접 작용력

3. 교량단부 콘크리트궤도 사용성 검토를 위한 매개변수 해석

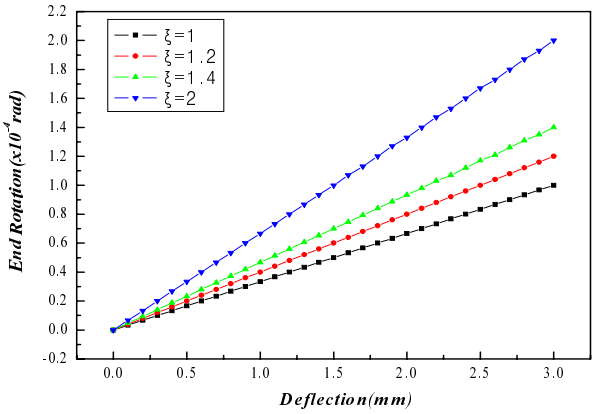
3.1 교량/궤도의 자중 및 크리프와 건조수축의 영향

크리프와 건조수축에 의한 영향은 궤도 부설 후 발생분만을 고려한다. 그림 2.는 2차 고정하중에 의한 교량의 처짐과 단부회전각의 관계를 나타내며, 경간길이(L), 지속하중의 작용시간에 대한 계수(ξ), 압축철근비(ρ')에 대해 검토한 결과이다. 여기서 2차 고정하중에 의한 교량의 처짐은 철도교량설계 시 계산한 값을 그림 2.에 적용하여 검토할 수 있을 것이다.

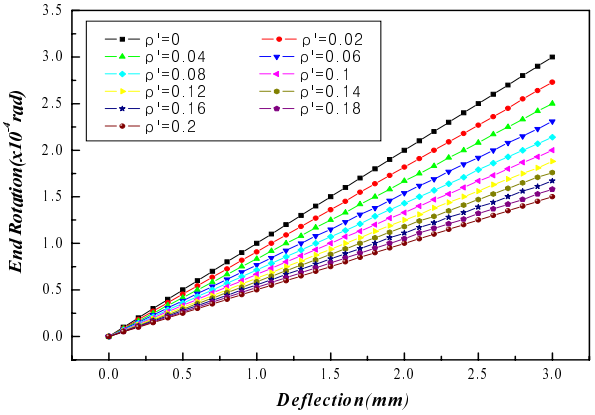
검토결과 경간길이가 짧을수록, 지속하중의 작용시간이 길수록, 압축철근비가 낮을수록 단부회전각은 증가하였다.



(c) 경간길이(ξ=2, ρ'=0.02)



(a) 지속하중의 작용시간(L=40m, ρ'=0.02)



(b) 압축철근비(ξ=2, L=40m)

그림 2. 교량/궤도의 자중 및 크리프와 건조수축의 영향

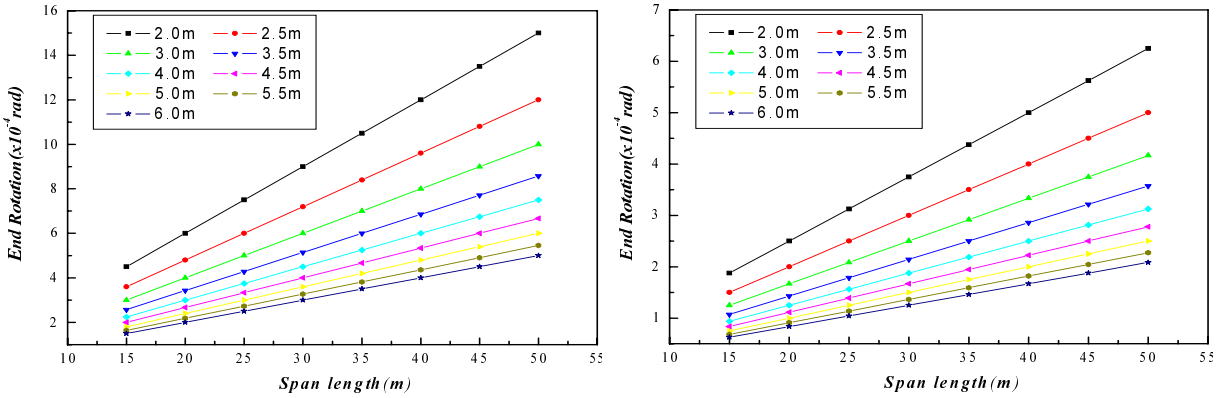
3.2 교량 상부구조의 상하면 온도차

"철도교설계기준 2.18 온도변화, 건설교통부"에서는 강교 및 합성형교와 콘크리트교에 대해 표 2.와 같이 열팽창계수 및 상하면 온도차를 적용할 것을 제시하고 있다.

표 2. 열팽창계수 및 상하면 온도차

	열팽창계수(α)	상하면 온도차(ΔT, ° C)
강교 및 합성형교	1.2e-5	10
콘크리트교	1.0e-5	5

그림 3.에서는 경간길이(L)와 상부구조높이(h)에 따른 상부구조 상하면 온도차에 따른 단부회전각의 변화를 검토하였다. 콘크트리교에 비해 강교 및 합성형교가 동일한 경간 및 상부높이를 가질 때 약 2배이상 단부회전각이 크게 발생하였으며, 경간길이가 길수록, 상부구조의 높이가 작을수록 단부회전각이 증가하는 것으로 분석되었다.



(a) 강교 및 합성형교 (b) 콘크리트교

그림 3. 교량 상부구조의 상하면 온도차의 영향(변수 : 상부구조 높이)

3.3 교각 기초의 부등침하

교각의 잔류 부등침하량은 최대 5mm까지를 검토하였다. 그림 4.는 잔류 부등침하 발생 시 교량길이에 따른 단부회전각의 발생량을 나타낸다. 부등침하 발생 시 경간길이가 짧을수록 단부회전각이 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

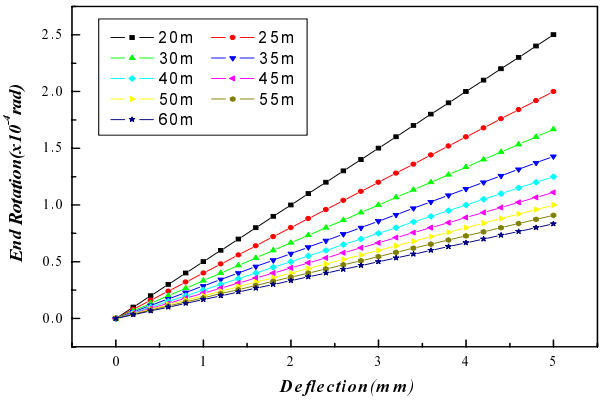


그림 4. 교각 기초의 부등침하에 따른 영향(변수 : 교량길이)

3.4 교각 전후면 온도차에 의한 교각 상부회전

교각 전후면 온도차는 최대 5°C로 하였으며, 콘크리트의 열팽창계수를 적용하였다.

그림 5.는 교각의 두께에 따른 단부회전각의 변화를 교각높이에 대해 검토한 결과이다. 교각의 두께가 증가할수록 교각높이가 낮을수록 교각 전후면 온도차에 의한 단부회전각 발생량이 작았다.

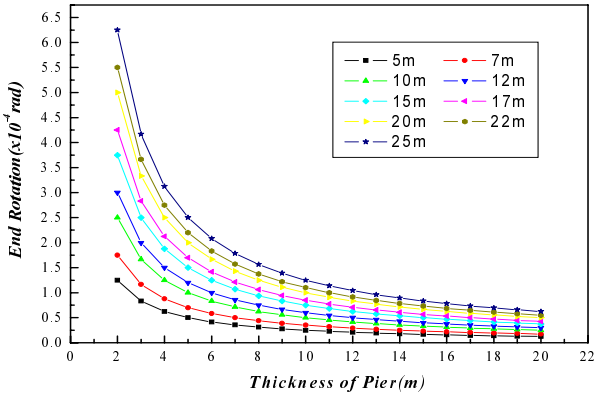
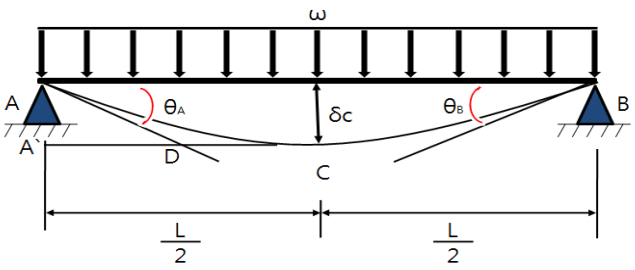


그림 5. 교각 전후면 온도차에 의한 교각 상부 회전(변수 : 교각높이)

3.5 열차수직하중에 의한 영향

(1) 해석모델

교량의 단부회전각(θ) 및 중앙부 처짐(δ_c)은 아래 식과 같이 교량의 강성(EI)에 반비례하고 하중(w) 및 경간길이(L)에 비례한다 (그림 6. 참조).

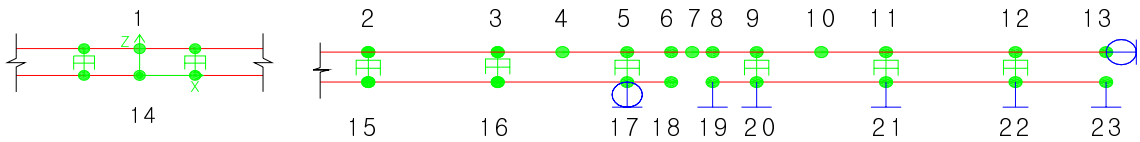


$$\theta = \frac{24wl^3}{EI},\ \delta_c = \frac{5wl^4}{384EI}$$

그림 6. 최대처짐 및 단부회전각

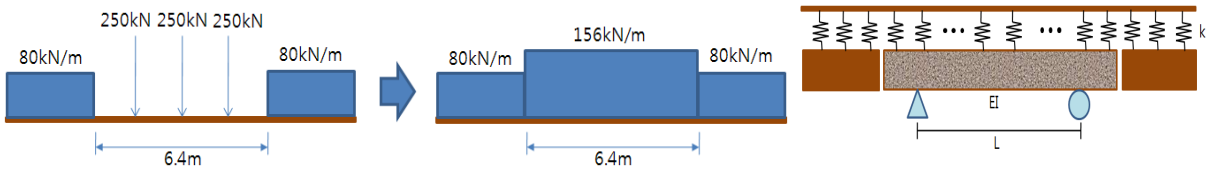
여기서, 경간길이와 하중이 동일하다면 교량의 단면강성에 의해 단부회전각에 차이가 발생할 것이며 체결장치의 궤도지지강성이 일정하다면 단부회전각에 따른 교량단부 지점의 최대압상력(Uplift force)과 최대압축력(Compression force)이 정해질 수 있을 것이다.

따라서 궤도-교량 상호작용을 고려한 교량상 콘크리트궤도 단부의 거동을 검토하고자 그림 7.과 같이 교량과 교대부를 가정하여 모델링하였다. 궤도(레일)와 교량은 프레임(frame) 요소로 탄성패드는 스프링(spring)요소로 적용하였으며, 감소계수(λ), 동적계수(R_2), 충격계수(ψ)를 고려한 HL-25(LM 71) 하중[4]에 대해 단순교량의 단면강성, 경간길이를 단계별로 변화시켰을 때 단부회전각에 따른 교량단부 지점의 최대 부상력(Uplift force)과 최대 압축력(Compression force)을 검토하였다.



(a) 중앙부 (b) 교량단부 및 교대부

그림 7. 시험체 모델링



(a) 하중모델(HL-25) (b) 교량모델(단순교)

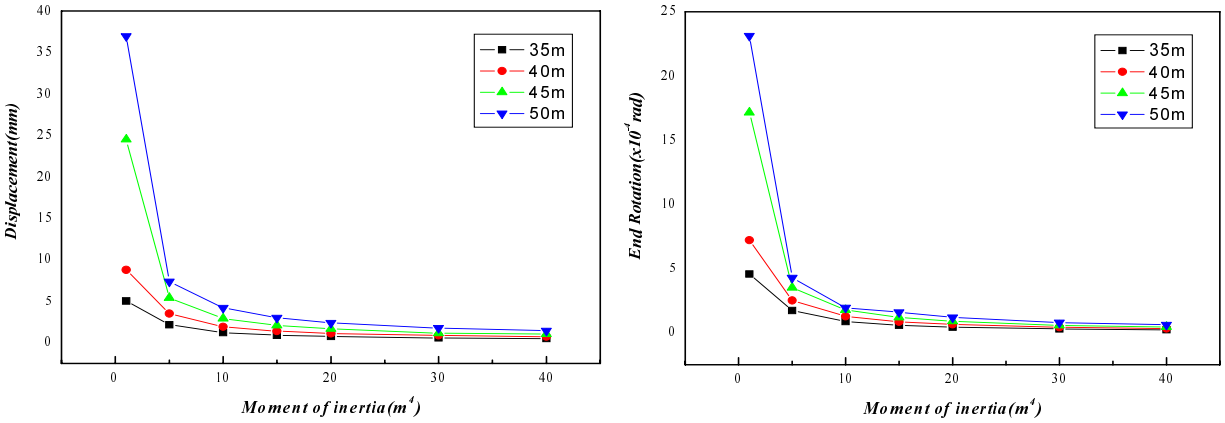
그림 8. 해석모델 구분

(2) 해석결과 및 분석

① 교량 단면강성 및 경간길이에 따른 영향

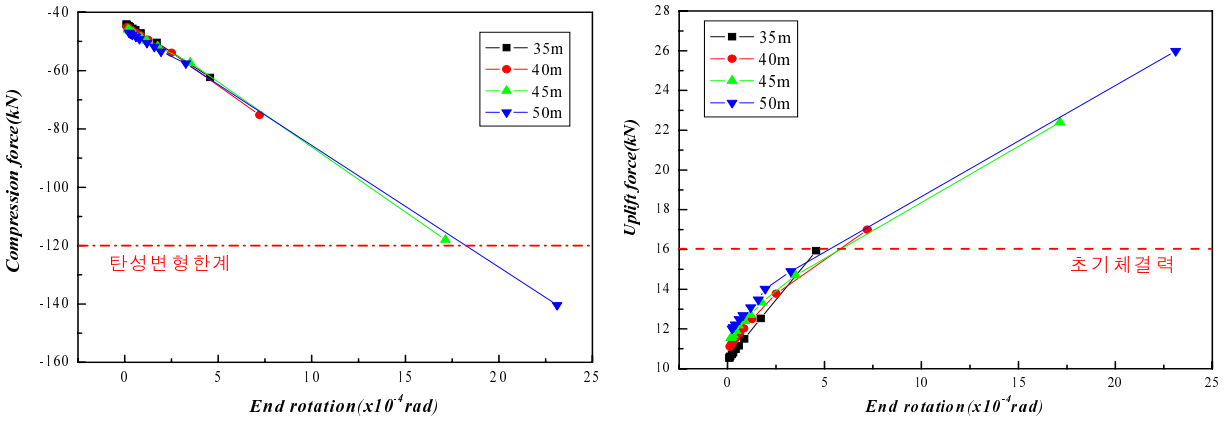
경간길이 35, 40, 45, 50m에 대하여 레일지지점간격 및 체결장치의 궤도지지강성을 일정하게 한 후 교량의 단면강성만을 변화시켰을 때 교량 중앙부 처짐과 단부회전각을 검토하여 그림 9.에 나타내었다. 또한, 교량 단면강성변화에 따라 발생한 중앙부 처짐 및 단부회전각과 교량단부 지점의 최대압상력(Uplift force)과 최대압축력(Compression force)의 관계를 검토하여 그림 10.에 나타내었다. 단, 제시

한 초기체결력과 탄성변형한계치는 체결장치의 종류에 따라 상이할 수 있다.



(a) 교량중앙부 처짐 (b) 단부회전각

그림 9. 교량 경간길이 및 단면강성에 따른 교량의 정적응답

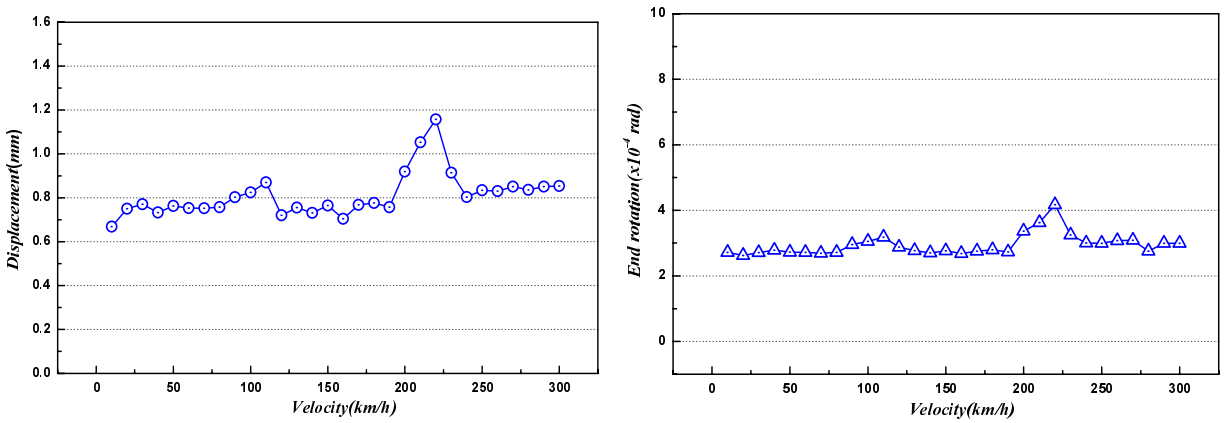


(a) 교량부 압축력 (b) 교대부 압상력

그림 10. 단부회전각에 따른 궤도사용성 검토결과

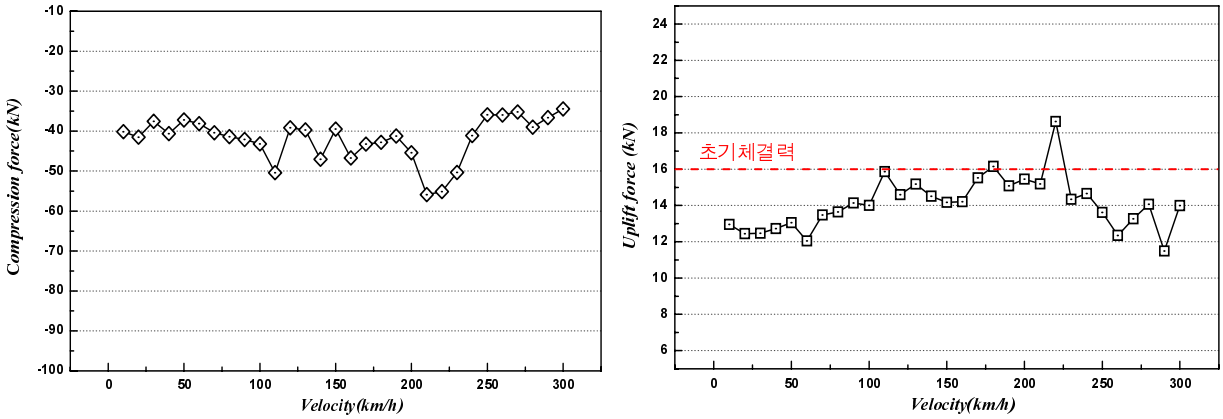
② 실열차하중에 의한 교량단부 사용성 검토

KTX 실열차하중에 의해 45m 해석모델(I=5m^4)의 공진 시 교량의 동적응답은 그림 11.과 같으며, 교량단부 지점의 최대압상력(Uplift force)과 최대압축력(Compression force)은 그림 12.와 같다.



(a) 교량중앙부 처짐 (b) 단부회전각

그림 11. KTX열차하중에 의한 교량의 동적응답(45m 단순교)



(a) 교량부 압축력 (b) 교대부 압상력

그림 12. KTX열차하중에 의한 궤도사용성 검토결과(45m 단순교)

교량의 동적응답에 따른 궤도사용성을 검토한 결과 공진속도대역에서 압축력 및 압상력이 증가하였으며, 압축력의 경우 허용기준에 상당한 여유를 확보하고 있었으나 압상력의 경우 초기체결력(16kN)을 초과하였다. 따라서 정적설계 시 검토한 궤도사용성 검토결과가 안정적이라 할지라도 공진 시 실열차하중에 의한 교량의 동적응답이 증가함에 따라 체결장치에서 발생하는 압축력 및 압상력이 증가할 수 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 콘크리트궤도 부설교량의 궤도사용성 검토를 위해 정·동적 작용력에 대한 매개변수 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 작용력에 의한 단부회전각 크기는 열차수직하중에 의한 영향이 가장 크고 다음으로 강교 및 합성형교 상부구조의 상하면 온도차에 의한 영향이 큰 것으로 분석되었으며, 교각 기초의 부등침하 및 압축철근비에 의한 영향이 가장 작은 것으로 나타났다.
2) 단부회전각을 감소시키기 위한 방법으로 경간길이를 증가시키는 것은 크리프 및 건조수축에 의한 영향과 교각기초의 부등침하에 의한 영향에는 효과적이나 교량 상하면 온도차 및 열차수직하중에는 반대되는 영향을 미칠 수 있으며, 교량 상부구조의 높이를 증가시키는 것은 교량 상부 상하면 온도차에 의한 영향 및 열차수직하중에 의한 영향에 매우 효과적인 것으로 분석되었다. 또한, 교각높이가 낮을수록 교각폭이 클수록 단부회전각 저감에 효과적인 것으로 나타났다.
3) 궤도를 모델링한 철도교량 해석을 통해 단부회전각과 체결장치의 압축력 및 압상력이 비례적인 관계에 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국철도시설공단에서 재정적 지원을 받고 있는 “철도교량 동적안정성 및 동적설계기준에 관한 연구”의 일환으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Anil K. Chopra, "Dynamics of structures"
2. E.C. Hambly, "Bridge Deck Behavior", E&PN SPON, 1991, pp 1-221.
3. Coenraad Esveld, "Modern Railway Track"
4. 한국철도시설공단, “호남고속철도 설계관련 연구용역 제공자료”, 2007.2.28
5. 한국철도시설공단, “철도교량 동적안정성 및 동적설계기준에 관한 연구-중간보고서”, 2007.12
6. 건설교통부, “철도설계기준(철도교편)”, 2004