

레일과 교량의 상호작용 매개변수 분석 연구

Parametric Study on Rail and Bridge Interaction

김종민* · 한상윤** · 임남형*** · 김정훈**** · 강영종*****
Kim, Jong Min · Kim, Jung Hun · Han, Sang Yun · Lim, Nam Hyoung · Kang, Young Jong

ABSTRACT

CWR(Continuous Welded Rail) and bridge interaction produce rail force, bridge displacement and rail/bridge relative displacement. Each of these has limitation by many codes. In this paper, analysis of interaction has been carried out by using foreign codes(UIC 774-3 R code of Europe etc.) because there is no code about interaction between rail and bridge in Korea.

Recently, railway bridges with CWR has been constructed for structural and economical reasons. When designer plans railway bridges, design a bridge model first and then investigate railway forces and displacement by interaction analysis. If these results go out bounds from limitation, designer plans railway bridges again and again.

In this paper, using the parametric study on CWR and railway bridge interaction, railway bridge parameters such as length of bridge span, area of bridge, moment of inertia, stiffness of pier, etc. are presented. It helps preliminary design of railway bridges.

Keywords: CWR, Rail/Bridge Interaction, Preliminary Design Chart

1. 서론

교량구간을 지나는 장대레일의 축력에 관한 기존의 연구 결과를 살펴보면 레일축력은 토공구간에서는 축력과 변위의 변화가 거의 없는 일정한 값을 유지하는 경향을 보이지만 교량구간에서는 교량에 발생하는 변위가 도상을 통하여 레일에 전달되고, 레일에 발생하는 변위 역시 도상을 통하여 교량에 영향을 주게 되는데 이를 레일과 교량의 상호작용이라 하고, 상호작용을 통해 발생하는 레일의 축력에 대한 검토와 교량의 절대 변위 및 교량과 레일의 상대변위에 대한 검토를 하는 것을 상호작용 해석이라고 한다. 이러한 검토가 필요한 이유는 레일에 발생하는 축 응력은 좌굴이나 파괴를 일으키는 등 레일의 안전성에 직접적으로 영향을 주고, 발생하는 변위는 그 정도가 심할 경우 도상의 흐트러짐을 유발하여 레일과 교량의 상호작용 해석 검토에서 사용되었던 도상의 저항력이 현격히 저하될 수 있고 이러한 변화는 레일의 축력 해석 결과에 큰 영향을 주

* 정회원 · 고려대학교 건축 · 사회환경공학과 박사과정 Email: jongmin07@korea.ac.kr
** 고려대학교 강구조공학협동과정학과 박사과정 Email: kiss0521@korea.ac.kr
*** 충남대학교 토목환경공학부 조교수 Email: nhrim@cnu.ac.kr
**** 고려대학교 건축 · 사회환경공학과 박사과정 Email: zamsin97@korea.ac.kr
***** 정회원 · 고려대학교 건축 · 사회환경공학과 교수 Email: yjkang@korea.ac.kr

기 때문이다.

철도 교량을 설계할 때에는 이러한 레일과 교량의 상호작용 해석을 수행하게 되는데 현재의 철도 교량구간 설계는, 철도 교량을 우선적으로 설계한 후 상호작용 해석을 수행하여 이 때 상호작용 해석의 결과가 기준에 맞지 않을 시엔 처음부터 다시 철도 교량을 설계를 하고 있어 이에 따른 번거로움이 있다. 이를 피하기 위해 철도 교량의 지간장을 줄여 축력과 변위를 감소시키거나 교량을 과다설계 하는 경우까지 생긴다.

본 연구에서는 철도교량 설계시의 번거로움을 줄이기 위해 교량의 지간장과 형식, 하부구조 강성, 교량의 단면적, 단면2차모멘트 등을 매개변수로 잡고 레일과 교량의 상호작용 해석을 실시한 후 허용치 이내에 있는 철도 교량의 매개변수들을 Preliminary Design Chart를 통하여 제시하고자 한다.

2. 해석 모델

본 연구에서의 상호작용 해석은 범용구조해석 프로그램인 ABAQUS 6.6-1을 이용하여 수행하였다. 철도 교량을 이루고 있는 레일-체결장치-침목, 도상, 교량 상부구조, 그리고 교각에 대한 구조 해석 모델은 다음과 같다.

2.1 레일-체결장치-침목

레일-체결장치-침목으로 구성되어 있는 구조물은 각각을 표현하지 않고 전체를 하나의 보로 치환하여 표현하였다. 보 요소는 전단변형을 무시한 오일러빔이면서 6자유도를 갖는 요소(B33)를 사용하였고 하나의 궤도에 대한 해석만을 수행하였다. 보 요소에 대한 제원은 표 1, 2와 같다.

표 1. 보 요소의 단면 제원

A	I_x	I_y	K_T	탄성계수(E)	전단계수(G)	열팽창계수(α)
0.0155 (m^2)	6.18×10^{-5} (m^4)	1.024×10^{-5} (m^4)	9.2962×10^{-6} (m^4)	2.1×10^8 (kN/m^2)	8×10^7 (kN/m^2)	1.2×10^{-5} ($^{\circ}C$)

표 2. 보 요소의 물성치

2.2 도상 저항

도상 저항력에는 종 방향 도상 저항력, 횡 방향 도상 저항력 그리고 회전 도상 저항력이 있다. 본 연구에서는 직선 궤도만을 사용하였으므로 종 방향 도상 저항력만을 고려하였다. 종 방향 도상 저항력은 SPRING 요소를 이용하여 표현하였으며 유럽의 상호작용 기준코드인 UIC 774-3 R을 참고하여 그림 1과 같은 Bi-linear 재료 모델을 사용하였다. 열차의 연직하중이 작용하면 누르는 힘에 의해 도상에 마찰력이 커지면서 도상 저항력 역시 증가하는데 UIC 774-3 R에서는 도상 저항력의 증가를 연직하중이 없을 때의 3배로 정의하고 있다. 이를 참고하여 열차의 연직하중이 없는 경우에는 최대 종 방향 도상 저항력을 침목 당 12kN으로 하였고 연직하중이 재하된 경우에는 침목 당 36kN으로 하였다. 두 경우 모두 소성항계변위는 0.002m로 하였다.

2.3 교량

본 연구에서는 고속철도 구간에 가장 많이 쓰이는 PSC BOX 거더교 및 일반 철도교에서 많이 쓰이는 판형교를 대상으로 하였다. 교량은 하나의 보 요소로 표현하였고 레일-체결장치-침목에서 사용되었던 요소

(B33)와 동일하게 사용하였다. 그리고 매개변수 범위를 좁히기 위하여 실제 시공된 PSC BOX 거더교와 판형교를 조사하여 매개변수 범위를 정하였다. 교량의 매개변수 및 제원은 표 3 ~ 6 과 같다.

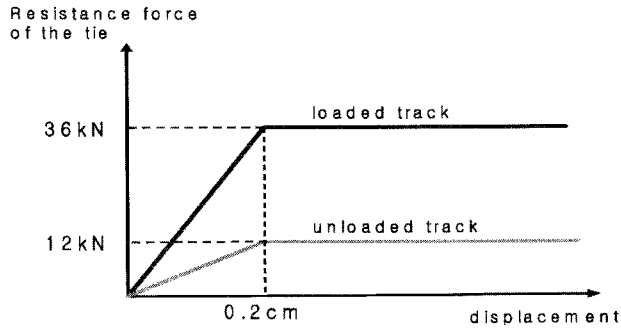


그림 1. Bi-linear 형상을 갖는 종 방향 도상저항력

표 3. PSC BOX교량의 매개변수 해석 범위

Parameters						
교량형식	PSC BOX 교					
경간형식	단경간, 2경간, 3경간					
경간길이	25m, 40m, 60m, 80m					
거더의높이	3m		4.5m		6m	
중립축의 높이	1.8m	2.1m	2.7m	3.1m	3.5m	4.2m
하부구조의 강성	200MN/m, 300MN/m, 400MN/m					
교량의 단면적	10m ² , 15m ² , 20m ²					
교량의 단면2차모멘트	10m ⁴ , 15m ⁴ , 20m ⁴ , 25m ⁴					

표 4. PSC BOX교량의 제원

탄성계수(E)	2.1×10 ⁸ (kN/m ²)
전단계수(G)	8×10 ⁷ (kN/m ²)
열팽창계수(α)	1.0×10 ⁻⁵ (1/°C)

표 5. 판형교량의 매개변수 해석 범위

Parameters				
교량형식	판형교			
경간형식	단경간			
경간길이	25m, 40m, 60m			
거더의높이	3m		4.5m	
중립축의 높이	1.8m	2.1m	2.7m	3.1m
하부구조의 강성	200MN/m, 300MN/m, 400MN/m			
교량의 단면적	0.5m ² , 1.0m ²			
교량의 단면2차모멘트	0.5m ⁴ , 1.0m ⁴			

표 6. 판형교량의 제원

탄성계수(E)	2.1×10 ⁸ (kN/m ²)
전단계수(G)	8×10 ⁷ (kN/m ²)
열팽창계수(α)	1.14×10 ⁻⁵ (1/°C)

2.4 적용 하중 및 허용 기준

교량 및 레일에 작용하는 하중으로는 온도하중, 시·제동 하중 및 연직하중을 적용하였다. 모든 하중은 UIC 774-3 R을 참고하였다. 우선 온도하중은 교량 상부구조에 $\pm 35^{\circ}\text{C}$ 의 온도 변화를 주었다. 나머지 하중들은 모두 레일에 재하 시켰는데, 시동하중의 경우 열차진행 반대 방향으로 33kN/m 의 크기로 최대 30m에 걸쳐 고르게 작용시켰으며 제동하중의 경우 열차진행 방향으로 20kN/m 의 크기로 최대 300m에 걸쳐 작용하였다. 연직하중의 경우 열차의 중력 방향으로 80kN/m 의 크기로 최대 300m에 걸쳐 고르게 작용한다. 여기서, 시·제동 하중 및 연직하중은 토공 구간이 아닌 교량 구간 위의 하중만을 고려한다.

해석 실시 후 축력과 변위의 허용 기준역시 UIC 774-3 R을 참고하였다. UIC 774-3 R에서는 기본적으로 UIC60 레일을 사용하고 곡선 반경 1500m 이상의 장대레일이라는 가정 하에 표 7의 검토 기준을 가진다.

표 7. UIC 검토 기준

	하중	허용기준	이유
레일 응력	거더의 온도변화($\pm 35^{\circ}\text{C}$) 시·제동하중 연직하중	72MPa (압축응력) 92MPa (인장응력)	레도 안정성 확보
교량과 레일의 종방향 상대변위	시·제동하중	4mm	도상의 흐트러짐 방지
교량의 종방향 절대변위	시·제동하중	$\pm 5\text{mm}$	도상의 흐트러짐 방지

3. 연구 진행 순서

PSC Box교와 판형교량에서 레일과 교량의 상호작용 해석을 실시하였다. 연구 진행 순서로는 우선 교량 형식을 정하고 경간의 길이를 결정한 다음 매개변수들을 바꾸어 가면서 해석을 실시한다. 모든 매개변수에 대한 상호작용 해석이 끝나면 같은 형식의 교량을 이어가면서 즉, 교량의 총 연장길이를 늘리면서 다시 매개변수들에 대한 상호작용 해석을 실시한다. UIC 774-3 R에 있는 기준에 도달할 때 까지 교량구간을 연장시켜 상호작용 해석을 실시한 후 매개변수 들에 대한 해석결과를 Preliminary Design Chart를 통하여 제시한다. 한 경간 길이가 끝나면 다른 경간 길이에 대하여서도 마찬가지로 레일-교량 상호작용 매개변수 해석을 수행하여 각 경간에 대해 Preliminary Design Chart를 제시한다.

4. 연구 결과

상호작용 매개변수 해석을 통하여 레일에 발생하는 축력과 변위에 대한 Preliminary Design Chart를 제시하였다. 축력은 레일 단면적으로 나누어 UIC 774-3 R의 응력기준과 비교하기 쉽게 하였다.

4.1 레일 응력의 Preliminary Design Chart

레일 응력의 Preliminary Design Chart는 레일의 인장응력, 압축응력 각각에 대하여 크게 단면적과 하부강성 별로 나누어서 만들었고, 교량 상부구조의 높이 H와 상부구조의 중립축의 위치 c별로 교량 단면 2차 모

멘트(m⁴)와 교량구간의 총 연장길이에 따라 나누어서 표시하였다. 또한 UIC 774-3 R 기준(압축응력 72MPa, 인장응력 92MPa)을 표시하여 쉽게 판별할 수 있게 하였다. PSC BOX 교량의 경우 경간당 12개의 Chart가 나오게 되어 총 48개의 Chart를 구하였고 관형교량의 경우 경간당 12개의 Chart로 총 36개의 Chart를 구하였다. 그림 2는 대표적으로 단경간 80m PSC Box교량에서 단면적 10m², 하부강성 400MN/m 일 때의 레일의 압축응력에 대한 Preliminary Design Chart를 보여주고 있다.

4.2 변위의 Preliminary Design Chart

변위의 Preliminary Design Chart는 상대변위, 절대변위 각각에 대하여 크게 하부강성 별로 나누어서 만들어졌고, 교량 단면적(m²)과 교량구간의 총 연장길이에 따라 나누어서 표시하였다. 변위 해석시 교량 거더의 높이 H와 중립축의 위치 c는 결과값에 영향을 주지 않아서 Chart에 나타나 있지 않다. 또한 UIC 774-3 R 기준(상대변위 4mm, 절대변위 5mm)을 표시하여 쉽게 판별할 수 있게 하였다. 파란 점선은 상대변위 기준을, 붉은 실선은 절대변위의 기준을 표시하였다. 경간당 3개의 Chart, 즉, 총 12개의 Chart를 구하였다. 그림 3은 단경간 60m PSC Box교량에서 하부강성 200MN/m 일 때의 변위 Preliminary Design Chart이다.

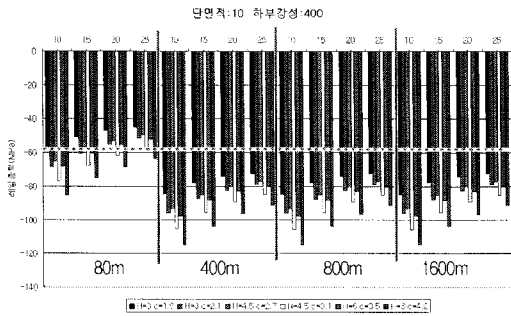


그림 2. 응력의 Preliminary Design Chart
단경간 80m PSC Box 교량
단면적: 10m², 하부강성: 400MN/m

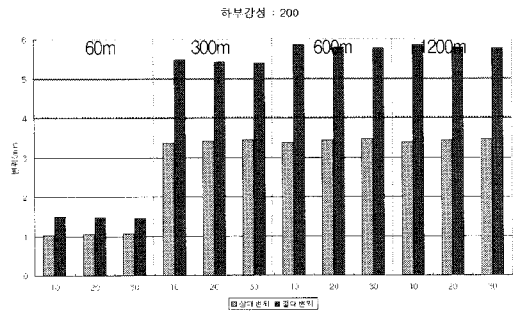


그림 3. 변위의 Preliminary Design Chart
단경간 60m PSC Box 교량
하부강성: 200MN/m

4.3 PSC BOX 교량의 상호작용 매개변수 해석 결과

PSC BOX 교량 지간장 25m, 40m, 60m, 80m 의 단경간, 2경간, 3경간에 대하여 매개변수 해석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- ① 경간장 80m 교량: 일반적으로 적합하지 않다.
- ② 경간장 60m 교량: 단경간 일 때 안전, 2경간, 3경간 연속교에서는 Preliminary Design Chart 필요
- ③ 경간장 40m 교량: 단경간, 2경간 연속교에서 안전, 3경간 연속교에서는 P.D.C 필요
- ④ 경간장 25m 교량: 단경간, 2경간, 3경간 연속교 모두 안전.

4.4 판형교량의 상호작용 매개변수 해석 결과

판형교량 지간장 25m, 40m, 60m 의 단경간에 대하여 매개변수 해석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- ① 경간장 25m, 40m서는 안전
- ② 경간장 60m: P.D.C 필요

5. 결론 및 향후연구계획

현재 고속철도에서 가장 많이 쓰이는 PSC BOX 교량과 판형교량의 다양한 매개변수에 대하여 레일-교량 상호작용 해석을 실시한 후 Preliminary Design Chart 를 제시하고 UIC 774-3 R 기준을 명시함으로써 그 매개변수에 해당하는 교량의 안전성 여부를 쉽게 판별할 수 있게 하였다. 향후 PSC BOX교량과 판형교량 이외의 다른 철도 교량과, 3경간 이상의 다경간의 교량 형식 대해서도 매개변수 해석을 실시하여 다양한 자료를 축적한다면, 철도 교량 설계자로 하여금 충분히 Preliminary Design 을 가능케 하는 좋은 자료가 되리라 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행된 연구임 (No. M10500000119-06J0000-11910)

참고문헌

- 강민철 (2006) 곡선궤도와 곡선교량의 상호작용 해석 기법 연구, 한국철도학회 학술대회 논문집
- 서사범 (2006) 선로공학(개정2판), BG북갤러리
- 진원중 (2006) 고속철도교량 하부구조 강성도에 관한 현장실험, 한국철도학회 논문집
- Esveld, C. (2003) 최신 철도선로, 열과알
- UIC (2001) Track/bridge interaction recommendation for calculations. 774-3 R, UIC