장대레일 궤도와 교량의 상호작용에 대한 매개변수 분석

Parametric study on Continuous Welded Rail and Bridge interaction

김종민* · 한상윤** · 임남형*** · 강영종****

Kim, Jong Min · 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.

key words : CWR, Rail/Bridge Interaction, Preliminary Design Chart

1. 서 론

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 절대변위 및 교량과 레일의 상대변위에 대한 검토를 하는 것을 상호작용 해석이라고 한다. 이러한 검토가 필요한 이유는 레일에 발생하는 축 응력의 경우 좌굴이나 파괴를 일으키는 등 레일의 안전성에 직접적으로 영향을 주기 때문이고 교량과 레일에 발생되는 변위에 대한 검토는 변위의 정도가 심할 경우 교량과 레일의 연결체인 도상에 흐트러짐을 유발하여 기존 상호작용 해석 검토에서 가정한 도상의 저항력을 현격히 저하시킬 수 있고 이러한 변화는 레일의 축력 해석 결과에 큰 영향을 주기 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 설계해야하는 번거로움이 있다. 이를 피하기 위해 철도 교량의 지간장을 줄이거나 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

* 비회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 · 석사과정

** 정회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 · 박사과정

*** 정회원 · 충남대학교 토목공학과 · 조교수

**** 정회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 · 교수

철도 교량의 매개변수들을 Preliminary Design Chart를 통하여 제시하고자 한다.

2. 해석 모델

철도 교량은 레일-체결재-침목, 도상, 교량, 그리고 교각으로 이루어졌다. 이들의 구조 해석 모델에 대하여 설명하겠다. 구조 해석은 범용구조해석 프로그램인 ABAQUS 6.6-1을 이용하였다.

2.1 레일-체결재-침목

레일-체결재-침목으로 구성되어 있는 구조물을 하나의 빔 요소로 표현하였다. 빔 요소는 전단변형을 무시한 오일러 빔이면서 6자유도를 갖는 요소(B33)를 사용하였고 하나의 궤도에 대한 해석만을 수행하였다. 빔 요소에 대한 제원은 표 1, 2와 같다.

표 1. 빔 요소의 단면 제원

A	I_X	I_Y	K_T
155 (cm)	6180 (cm^4)	1024 (cm^4)	929.62 (cm^4)

표 2. 빔 요소의 물성치

탄성계수(E)	전단계수(G)	열팽창계수(α)
2.1×10^8 (kN/m^2)	8×10^7 (kN/m^2)	1.2×10^{-5} (/℃)

2.2 도상 저항

도상 저항력은 종 방향 도상 저항력과 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 UIC 774-3 R을 참고하여 그림 1과 같은 비선형 재료 모델을 사용하였다. 열차의 연직하중이 작용하면 누르는 힘에 의해 도상에 마찰력이 커지면서 도상 저항력 역시 증가 한다. UIC 774-3 R에서는 도상 저항력의 증가를 연직하중이 없을 때의 3배로 정의하고 있다. 즉, 열차의 연직하중이 없는 경우에는 최대 종 방향 도상 저항력을 침목 당 12kN으로 하였고 연직하중이 제하된 경우에는 침목 당 36kN으로 하였다. 두 경우 모두 소성한계변위는 0.2cm로 하였다.

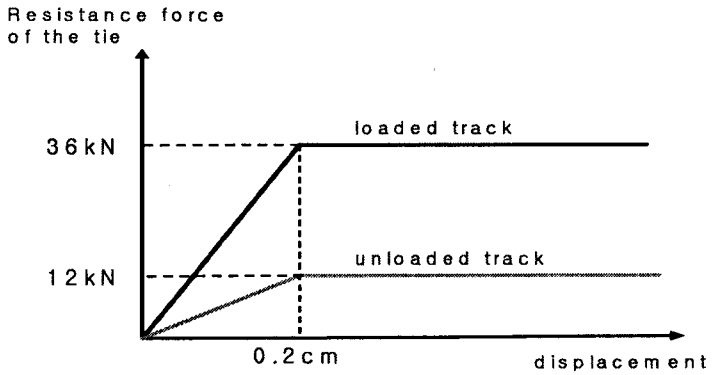

그림 1. 종 방향 도상저항력

2.3 교량

본 연구에서는 고속철도 구간에 가장 많이 쓰이는 PSC BOX 거더교를 대상으로 하였다. 교량은 하나의 빔 모델로 표현하였고 전단변형을 무시한 오일러 빔이면서 6자유도를 갖는 요소(B33)를 사용하였다. 실제 시공된 PSC BOX 거더교를 조사하여 매개변수의 범위를 정하였다. 교량 단면 매개변수 및 물성치는 표 3, 4와 같다.

표 3. 교량의 매개변수

Parameters						
경간형식	단경간					
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	$10m^2$, $15m^2$, $20m^2$					
교량의단면2차모멘트	$10m^4$, $15m^4$, $20m^4$, $25m^4$					

표 4. 교량의 물성치

탄성계수(E)	2.1×10^8 (kN/m^2)
전단계수(G)	8×10^7 (kN/m^2)
열팽창계수(α)	1.0×10^{-5} (/℃)

2.4 적용 하중 및 허용 기준

하중은 온도하중, 시·제동 하중, 연직하중을 적용하였다. 모든 하중은 UIC 774-3 R을 참고하였다. 우선 온도하중은 교량(거더)에 ±35℃의 온도 변화을 주었다. 또, 시동하중의 경우 열차진행 반대 방향으로 33kN/m의 크기로 최대 30m에 걸쳐 고르게 작용하며 제동하중의 경우 열차진행 방향으로 20kN/m의 크기로 최대 300m에 걸쳐 고르게 작용한다. 여기서, 시·제동하중은 교량 위의 하중만을 고려한다. 연직하중의 경우 열차의 중력 방향으로 80kN/m의 크기로 최대 300m에 걸쳐 고르게 작용한다. 여기서, 연직하중은 교량위의 하중만을 고려하였다.

허용 기준에서도 UIC 774-3 R을 참고하였다. UIC 774-3 R에서는 기본적으로 UIC60 레일을 사용하고 곡선 반경 1500m 이상의 장대레일이라는 가정 하에 표 5의 검토 기준을 가진다.

표 5. UIC 검토 기준

	하중	허용기준	이유
레일 응력	거더의 온도변화(±35℃) 시·제동하중 연직하중	72MPa (압축응력) 92MPa (인장응력)	궤도 안정성 확보
교량과 레일의 종방향 상대변위	시·제동하중	4mm	도상의 흐트러짐 방지
교량의 종방향 절대변위	시·제동하중	±5mm	도상의 흐트러짐 방지

3. 연구 진행 순서

PSC Box교 교량의 단경간의 경간의 길이를 결정한다. 그리고 매개변수들을 바꾸어 가면서 장대레일과 교량의 상호작용 해석을 실시한다. 상호작용 해석이 끝나면 같은 형식의 교량을 이어가면서 교량의 총 연장길이를 늘리면서 다시 매개변수들에 대한 상호작용 해석을 실시한다. UIC 774-3 R에 있는 기준에 도달할 때까지 교량구간을 연장시켜 상호작용 해석을 실시한 후 Preliminary Design Chart 를 통하여 UIC 774-3 R에 만족하는 매개변수들을 제시한다.

4. 연구 결과

4.1 레일 응력의 Preliminary Design Chart

그림 2는 단경간 80m PSC Box교량에서 단면적 10m^2, 하부강성 400MN/m 일 때의 레일의 압축응력에

대한 Preliminary Design Chart 이다. 레일 응력의 Preliminary Design Chart는 인장응력, 압축응력 각각에 대하여 크게 단면적과 하부강성 별로 나누어서 만들었고, 교량 거더의 높이 H와 중립축의 위치 c별로 교량 단면 2차 모멘트(m^4) 와 교량구간의 총 연장길이에 따라 나누어서 표시하였다. 또한 UIC 774-3 R 기준(압축응력 72MPa, 인장응력 92MPa)을 표시하여 쉽게 판별할 수 있게 하였다. 경간당 12개의 Chart, 즉, 총 48개의 Chart를 구하였다.

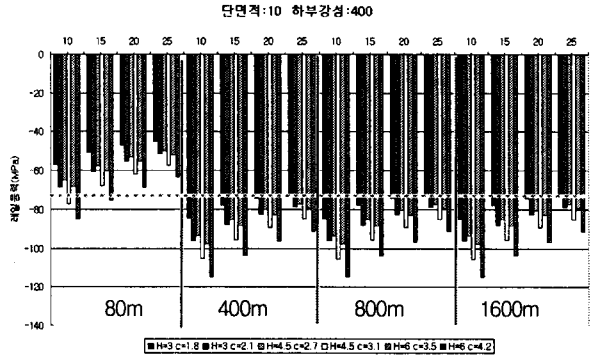

그림 2. 응력의 Preliminary Design Chart
단경간 80m PSC Box 교량
단면적: $10m^2$, 하부강성: 400MN/m

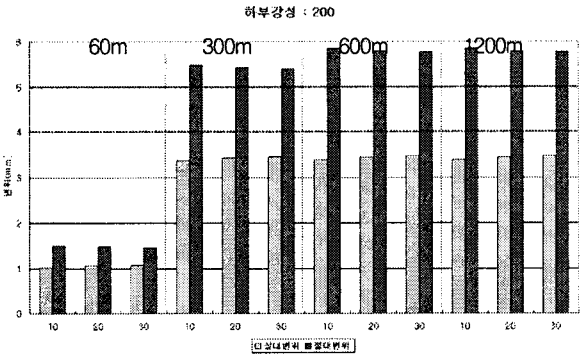

그림 3. 변위의 Preliminary Design Chart
단경간 60m PSC Box 교량
하부강성: 200MN/m

4.2 변위의 Preliminary Design Chart

그림 3은 단경간 60m PSC Box교량에서 하부강성 200MN/m 일 때의 변위 Preliminary Design Chart 이다. 변위의 Preliminary Design Chart는 상대변위, 절대변위 각각에 대하여 크게 하부강성 별로 나누어서 만들었고, 교량 단면적(m^2)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.

5. 결 론

본 연구에서는 단경간 PSC BOX에 대하여 UIC 774-3 R 기준을 만족하는 다양한 매개변수들을 Preliminary Design Chart 를 통하여 제시하였다. 향후 PSC BOX 외의 다른 철도 교량과, 2경간 이상의 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

1. 강민철 (2005). "곡선궤도와 교량의 상호작용 거동 분석", 고려대학교.
2. 서사범(2006). 선로공학(개정2판), BG북갤러리
3. 진원종 외 5명(2006). "고속철도교량 하부구조 강성도에 관한 현장실험", 한국철도학회 논문집
4. Esveld, C., 서사범 역(2003). 최신 철도선로, 얼과알
5. UIC(2001). Track/bridge interaction recommendation for calculations. 774-3 R, UIC.