

지반-구조물 상호작용을 고려한
교량상 장대레일의 비선형 지진응답해석
Nonlinear earthquake response analysis of CWR on bridge
considering soil-structure interaction.

신한철* 조선규** 양신추*** 최준성****
Shin, Han Cheol · Cho, Sun Kyu · Yang, Shin Chu · Choi, Jun Seong

ABSTRACT

Recently continuous welded rail is generally used to ensure running performances and to overcome the problems such as structural vulnerability and fastener damage at the rail expansion joint. Though the use of continuous welded rail on bridge has the advantage of decreasing the vibration and damage of rail, it still the risk of buckling and breaking of rail due to change of temperature, starting and/or breaking force, axial stress concentration and so on. So, UIC code and many methods has been developed by researchers considering rail-bridge interaction. Although there are many research concerning stability of continuous welded rail about temperature change on bridge and starting and/or breaking force, the study of continuous welded rail for earthquake load is still insufficient. In this study, the nonlinear seismic response analysis of continuous welded rail on bridge considering soil-structure interaction, geotechnical characteristic of foundation and earthquake isolation equipment has been performed to examine the stability of continuous welded rail.

1. 서 론

최근 레일 선축이음부에서의 구조적 취약성 및 체결구 손상등의 문제점을 보완하고 승차감 및 주행안정성 확보를 위해 교량상 장대레일의 사용이 일반화되고 있는 실정이다. 이러한 교량상 장대레일 구조는 소음·진동 및 레일의 손상을 저감할 수 있다는 긍정적인 측면이 있는 반면, 온도 변화 및 시세동 하중 등의 종방향 하중에 의해 용역이 집중되어 레일의 좌굴 및 파단의 위험성이 존재하고 있다. 따라서 교량 설계시에 이 같은 문제점을 고려하기 위해 UIC CODE와 많은 연구자들에 의해 개발된 방법을 사용하여 레일과 교량과의 상호작용을 고려한 레일 축력의 검토가 선행되어 왔다. 한편, 교량상 온도변화와 시세동하중에 대한 장대레일의 안전성에 관한 검토는 많이 이루어져 왔지만, 이에 반해 교량기초의 지반조건에 따른 장대레일의 지진안전성에 대한 검토 및 연구는 상대적으로 미흡하다고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 지반-구조물 상호작용의 고려

* 서울과학기술공사 부장, 정회원
** 서울산업대학교 구조공학과 교수, 정회원
*** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원
**** 한국철도관리(주) 대표이사, 비회원

와 미끄러, 교량기초의 지반조건, 그리고 지진력리장치에 따른 교량상 장대레일의 비선형 지진응답 해석을 수행하여 교각과 교량, 교량과 장대레일의 상호작용으로 인한 결과 비교를 통해 장대레일의 안전성을 검토하고자 한다.

2. 레일-교량의 상호작용

장대레일 계도는 레일신속장치를 없애고 레일을 용접이음함으로써 기존의 레일 손상의 주된 부분인 레일 신속장치에서의 손상을 최소화할 수 있다는 장점을 갖는 반면, 레일이 장대화됨에 따라 온도변화 및 외력에 의해서 레일에 과도한 상대변위 및 축력이 발생할 우려가 있다. 특히 교량상의 장대레일에서는 교량과 레일 간의 상이한 거동 특성으로 인해 상대변위가 커지고, 교량의 거동에 의해 레일에 추가적인 축력이 발생하여 심각한 경우에는 레일 좌굴이나 파단을 일으킬 수도 있다. 레일 안정성 검토에 있어서 레일의 축력에 영향을 미치는 영향인자는 크게 궤도구조와 교량구조로 나눌 수 있다. 교량구조의 영향인자는 지점의 위치 및 종류, 교량의 신속길이, 교량상판의 단면계수 및 단정계수, 지점의 강성, 교량상판의 중립축의 위치 등을 들 수 있으며, 궤도구조 측면에서의 영향인자는 레일의 종방향 변위에 대한 저항력, 레일의 단면적, 레일 신속이음의 유무, 궤도 유지보수 수준 등을 들 수 있다. 이러한 영향인자 중에서 레일 축력 해석시에 반드시 고려해야 하는 항목은 도상의 비선형 거동과 작용하중, 그리고 교량 하부구조로 본 연구에서는 이러한 인자중에서도 하부구조인 구조물과 지반조건의 상호작용을 통해 해석적으로 검토하였다.

3. 지반-구조물의 상호작용(Soil-Structure Interaction, SSI)

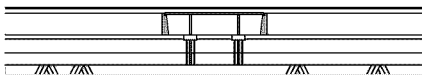


그림 1. 실제문제

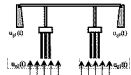


그림 2. 이상화원문제

본 연구에서는 교량구조물의 지진응답해석을 부분구조법을 적용하여 그림 3, 그림4와 같이 지지점을 제외한 교각 및 교량상부구조물의 변위가 0인 파동산란문제와 기초에 입사하는 지진이 교각 하단에 작용하는 하중으로 지환된 파동방산문제의 중첩으로 나타내어 해석을 수행하였다.

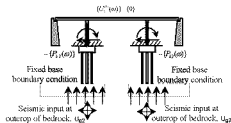


그림 3. 파동산란문제

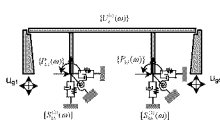


그림 4. 파동방산문제

그림 4에서 $[S_{bb}^{(2)}(\omega)]$ 와 $[S_{bb}^{(3)}(\omega)]$ 는 각각 2변 지지점과 3변 지지점에서 교량 기초 상부 무결광강판의 임피던스 함수로서 그림 5의 step 3에 도시한 것처럼 교량구조물이 없는 상태에서 지반-구조물의 상호작용을 고려하여 구한다. 이 임피던스 함수는 주파수종속적인 특성이 있어서 그림 4의 문제를 정확하게 해석하기 위해서는 주파수영역해법을 적용해야 하지만, 실용적인 측면에서 SAP2000/Nonlinear와 같은 범용 구조해석 프로그램을 사용하기 위하여 교량의 동적거동을 지배하는 주요 주파수범위에서 다음 식과 같이 주파수와 무관한 강성계수, 질량, 감쇠계수로 근사하였다.

$$[S_{bb}^{(j)}(\omega)] \approx [\Delta K_{bb}^{(j)}] + i\omega[\Delta C_{bb}^{(j)}] - \omega^2[\Delta M_{bb}^{(j)}], \quad j=2,3 \quad \text{식 (1)}$$

여기서 $i = \sqrt{-1}$ 는 원주파수이고 이며, $[\Delta K_{bb}^{(j)}]$, $i\omega[\Delta C_{bb}^{(j)}]$, $\omega^2[\Delta M_{bb}^{(j)}]$ 는 각각 지지점 j 의 교각기초 상부 무질량 유흥강판의 지중에 대한 강성행렬, 감쇠행렬, 질량행렬로서 철근콘크리트기초의 영향이 포함된 것이다. 식 (1)에서 구한 교각기초의 강성행렬, 감쇠행렬, 질량행렬은 그림 5의 step 5 해석에 사용되었다. 그리고 그림 3에 나타낸 주파수영역 유효지진하중 $\{P_{bb}^{(j)}(\omega)\}$ 는 교각기초의 임피던스함수 $\{S_{bb}^{(j)}(\omega)\}$ 와 그림 5의 step 4에서 구한 교각기초의 산란응답 $\{U_{bb}^{sc(j)}(\omega)\}$ 를 곱하여 다음과 같이 구한다.

$$\{P_{bb}^{(j)}(\omega)\} = [S_{bb}^{(j)}(\omega)]\{U_{bb}^{sc(j)}(\omega)\}, \quad j=2,3 \quad \text{식 (2)}$$

주파수영역에서 구한 유효지진하중 $\{P_{bb}^{(j)}(\omega)\}$ 를 식 (3)과 같이 Fourier 역변환하여 시간영역으로 변환한 다음, 이를 그림 5의 step 5의 전체구조를 지진응답해석에서 시간영역 유효지진하중 $\{p_b^{(j)}(t)\}$ 로 2번과 3번 지지점에 작용된다.

$$\{p_b^{(j)}(t)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-c\infty}^{c\infty} \{P_{bb}^{(j)}(\omega)\} d\omega, \quad j=2,3 \quad \text{식 (3)}$$

따라서, 운동방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ab} \\ M_{ba} & M_{bb} + \Delta M_{bb} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{u}_a'(t) \\ \ddot{u}_b'(t) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{ab} \\ C_{ba} & C_{bb} + \Delta C_{bb} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u}_a'(t) \\ \dot{u}_b'(t) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} + \Delta K_{bb} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_a'(t) \\ u_b'(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ p_b^{(j)}(t) \end{pmatrix} \quad \text{식 (4)}$$

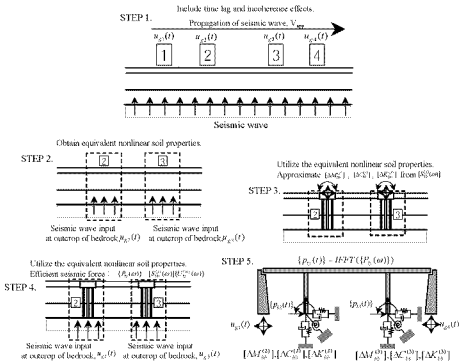


그림 5. 거진응답해석 과정

여기서 상첨자 "i"는 지진 발생전 정지상태에 대한 변위인 실패응답(total displacement)을 의미하고, 하첨자 "a"와 "b"는 각각 구조물의 자유도와 교각기초 상단 유흥강판의 자유도를 나타내며, 하첨자 "g"는 그림 4에서 좌우측 지지점의 자유도를 나타낸다.

4. SAP2000을 사용한 비선형 예제 해석

예제해석을 위해 유한요소법을 사용하여 레일/교량 상호작용해석을 수행하였다. 기존에는 자체적으로 프로그램을 개발하여 수행하였으나, 본 해석수행에는 지반-구조물 상호작용 프로그램인 KIESSI-2D와 연계수행하기 위해 상용프로그램인 SAP2000(Ver. Nonlinear 8.2.3)을 사용하였다. 모델에 있어서 레일과 교량을 2차원 요소로 모델화하였고, 레일과 교량 또는 레일과 노반사이에 작용하는 종저항력은 쌍일차모형을 갖는 비선형 스프링요소로 모델화하였다. 레일과 교량 사이의 도상은 UIC 기준에서 정한 [경간당 스프링의 개수는 10 이상 이여야 하고, 스프링사이의 간격은 5m를 초과하지 말아야한다] 는 조건을 만족하면서 스프링요소가 일정한 간격으로 등분포 되어 있는 것으로 가정하기 위하여 요소간격을 1m로 하였다. 더욱 정확한 결과를 얻기 위해서는 침목간격으로 분산되어 작용하는 것으로 가정하는 것이 바람직하다. 예제는 건설기술연구원에서 개발한 상대레일 축력해석 프로그램인 BRAILINT를 검증하기위해 사용한 모델을 사용하고, ERRI의 CWERRI와 Deflt 대에서 개발한 PROLS에 의한 해석결과와 비교하였다. 비교결과, 기존의 상대레일 축력 해석 프로그램들과 동일한 결과를 나타내었고, 또한 시간이력해석결과 그림 7에서 보는 것처럼 도상의 비선형성을 나타내는 힘-변위 그래프가 나타나는 걸로 보아 SAP2000(Ver. 8.2.3)은 상대레일 축력해석 프로그램으로 사용할 수 있다고 판단하였다.

표 1. 예제 모델의 물성치

	레일	교량	도상(1m당)	교차강성
탄성계수	$2.1 \times 10^4 \text{ KN/m}^2$	$2.5 \times 10^4 \text{ KN/m}^2$	한계저항력 $F_y=12.0\text{KN}$	교각 1,2,3 10 KN/mm
단면적	0.013868m^2	4.0m^2	한계변위 $U_y=2.8\text{mm}$	교각 4 100 KN/mm
열팽창계수	$1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$		

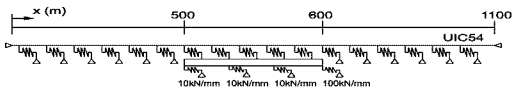


그림 6. 예제해석 모델 제원

- 온도하중 : -45°C (레일), -25°C (교량)

표 2. 온도하중에 대한 해석결과 비교

도상의 최대저항력 (kN/m)					
일반 구간	BRAILINT	12	교량 구간	BRAILINT	12
	SAP2000	12		SAP2000	12
교량 시점(x=500m)에서의 레일응력 (N/mm ²)					
CWERRI	PROLS	BRAILINT	SAP2000		
138	138	141.229	138.5		

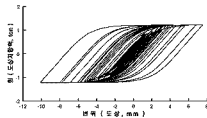
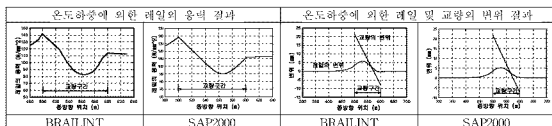


그림 7. 도상의 힘-변위 시간이력곡선

표 3. 온도하중에 따른 레일의 응력 및 변위 비교



③ 교량받침의 변위량 검토 (교량상부와 교각과의 상대변위, 단위 : mm)

교량받침의 상대변위는 전체적으로 볼 때, SSI의 고려로 인해 줄어든 결과값을 볼 수 있다. 또한, 탄성받침을 쓸 경우 교대에서의 변위가 급격히 줄어들음을 볼 수 있다. 교량받침의 상대변위는 case 1, 3, 5, 7의 경우 교각 #2의 교량받침은 고정된 상태이기 때문에 변위량이 0을 나타내고 있다.

	case 1		case 2		case 5		case 6	
상대변위(mm)	교대#1	교각#1	교대#1	교각#1	교대#1	교각#1	교대#1	교각#1
	209.76	139.31	2.72	204.28	18.13	14.66	24.84	28.60
	교각#2	교대#2	교각#2	교대#2	교각#2	교대#2	교각#2	교대#2
상대변위(mm)	0	208.56	203.11	3.51	0	9.13	37.73	41.10
	case 3		case 4		case 7		case 8	
상대변위(mm)	교대#1	교각#1	교대#1	교각#1	교대#1	교각#1	교대#1	교각#1
	132.58	61.70	3.62	104.77	18.56	14.82	60.17	64.04
	교각#2	교대#2	교각#2	교대#2	교각#2	교대#2	교각#2	교대#2
상대변위(mm)	0	31.77	131.72	3.98	0	9.87	73.17	76.44

④ 도상의 상대 변위 및 레일의 축력 결과

도상의 상대 변위 및 레일 축력값도 앞의 부재력 결과와 마찬가지로 SSI 미 고려시에 비해 SSI를 고려하게 될 경우 결과치가 줄어드는 양상을 보이고 있지만, SSI 고려시 탄성받침의 내진능력이 우수하지는 못한것으로 나타났다.

	case 1	case 2	case 5	case 6
상대변위(mm)	187.05	1.96	15.49	37.92
축력(tonf)	683.77	288.04	192.44	198.06
	case 3	case 4	case 7	case 8
상대변위(mm)	119.21	2.21	15.82	72.58
축력(tonf)	435.39	180.97	193.60	206.25

6. 결과

비선형 지진응답해석 수행 후 결과, SSI 고려시에 미고려시의 해석모델에 비해 레도구조물에 나타나는 결과값들이 줄어드는 양상을 보이고 있다. 이는 실제 지반-구조물 상호작용의 고려시 감쇠가 증가하여 그 영향이 상부구조물에 적용되어 부재력의 감소를 나타내는 것으로 판단된다. 그리고 도상의 상대변위 및 레일축력의 동적해석 검토결과, 탄성받침이 포트받침에 비해 반드시 내진능력이 우수하지는 못하는 것으로 나타났다. 앞으로, 다양한 동적해석모델과 지반조건, 및 지진 커리큘럼치 등에 대한 지진응답해석수행은 통한 교량상 장대레일의 축력 검토가 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. AASHTO(1999), "Guide Specifications for Seismic Isolator Design".
2. 도로교 설계 기준.
3. UIC(1995) UIC CODE 774-3, General Principles of Calculating Longitudinal Forces in a Bridge, its Bearings and its Structure - Recommendations for a simple case, 1st Edition.
4. 건설기술연구원(1998), "레일/교량구조물 상호작용에 관한 연구".
5. 김병석, 강재용(2000), "레일-교량상호작용을 고려한 장대레일 거동해석", 전상구조공학회 제13권 제2호.
6. 양진주, 이지하, 서사범(2000), "철도교량상의 장대레일 축력 해석 기법 개발", 한국철도선로기술협회 제8회 원도선로 기술발표회.
7. 양진주, 이안호, 나성훈, 권영태, "교량상의 장대레일 축력해석".
8. 김재민, 이명규, 신용우(2003), "다지점 지진입력에 대한 현수교의 지반-구조물 상호작용해석", 지진공학회 춘계학술 발표회.