

승용차 전용 조립식 고가도로의 내진설계 연구 Seismic Design of Prefabricated Light Weight Bridges

강형택* 박영하** 김성훈*** 이일근****
Kang, Hyeong-Taek Park, Young-Ha Kim, Sung-Hun Lee, Il-Keun

ABSTRACT

Increasing the volume of traffic on the roads causes social and economical problems such as increasing air-pollution and distribution cost. Prefabricated light weight bridge becomes a possible solution for these problems in the urban area where it is difficult to construct new one or expend the existing road. There are some merits in this kind of bridge. First, the design live and dead loads are minimized by allowing only passenger cars. Second employing prefabrication construction scheme reduces the construction time. Third, there is no need to buy land if the elevation road is placed on the top of existing one.

In seismic design of bridges, base isolation has been an effective solution when the bridge has stiff piers and a heavy superstructure. The prefabricated light weight bridge has different dynamic characteristics from the ordinary bridges. In this paper, the applicability of base isolators such as lead rubber bearing and elastomeric bearing, to prefabricated light weight bridge is examined.

1. 서 론

최근 차량의 지속적인 증가는 극심한 교통혼잡, 물류비 증가, 공해발생과 같은 경제적, 사회적 문제의 원인이 되고 있다. 특히, 수도권지역 고속도로와 주요지방도로의 교통량을 분석하여 보면 승용차 통행량이 차지하는 비율인 승용차 혼입률이 대략 70%선을 넘어서고 있어 승용차가 교통 혼잡을 유발하는 주요 원인임을 보여주고 있다. 도심구간에 있어서 도로의 신설 또는 기존 도로의

* 한국도로공사 도로연구소 책임연구원, 정회원
** 한국도로공사 도로연구소 책임연구원, 정회원
*** 한국도로공사 도로연구소 연구원
**** 한국도로공사 도로연구소 연구원

확장은 과도한 용지 보상비와 공사 기간 중 예상되는 교통혼잡으로 인하여 쉽지 않다. 이와 같은 문제의 해결방안으로 용지확보가 곤란한 도심지구간에서 고속도로나 간선도로의 확장시에 승용차 전용 조립식 고가도로를 활용하고자 한다. 승용차 전용도로로 제한하면 설계기준인 활하중이 현저하게 감소하기 때문에 부재 단면이 감소하고 고가도로로 건설함에 따라서 추가적인 용지 매입 규모를 최소화 하여 경제적인 공사가 가능하며, 조립식 시공으로 공사기간을 최소화하여 교통혼잡에 따른 편익비용 지출을 획기적으로 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

승용차 전용 조립식 교량의 상부 구조로는 소수주형 합성형, PC Box, 강상판형, 및 복합재료의 4가지 형식이 있으며 하부구조는 강제교각과 직접기초가 검토되고 있다. 일반교량에 비해 가벼운 상부구조와 강제교각으로 이루어진 승용차 전용 조립식 고가도로는 일반 교량과 동적특성 및 건설여건이 다르므로 이를 고려한 내진설계를 수행하였다. 내진설계에 널리 사용되고 하부구조에 전달되는 지진하중을 최소화시키기 위하여 지진격리받침을 적용하고 상부형식별로 이들 지진격리받침의 효율성을 비교 검토하였다.

2. 승용차 전용 조립식 고가도로의 특징

승용차 전용 조립식 고가도로의 설계하중은 일반 교량의 설계하중인 표준트럭하중(DB24) 43.2톤의 1/10 정도인 4.5톤을 설계하중으로 하였으며 시공기간을 단축하기 위하여 상부, 교각 및 기초의 시공에 있어서 공장 제작 및 현장조립이 가능하도록 설계를 하였다.

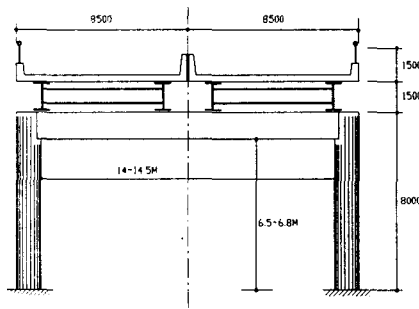
설계하중이 기존 교량의 10%로 매우 작기 때문에 상부구조의 경우에 일반교량에서 사용되는 PC Box, 강상판형 이외에도 프리캐스트 슬래브와 소수주형의 합성형, 복합재료거더의 구조가 검토되고 있다. 하부구조 또한 중공단면을 가진 강제교각을 사용하여 조립이 가능하도록 하였다.

승용차 전용 조립식 고가도로의 일반적인 특징을 일반 교량과 비교하여 보면 표 1과 같다. 일반 교량 상부중량은 1.2tonf/m² ~ 1.8tonf/m²로 평균 1.5tonf/m²이나 승용차 전용 조립식 고가도로의 평균상부 중량은 일반 교량의 45.3%인 0.68tonf/m²이다. 상부형식 중 중량이 매우 가벼우며 시공 사례가 없는 복합재료거더를 제외하면 0.86tonf/m²으로 일반교량의 상부중량의 57%로 매우 가볍다. 일반 교량의 지간은 상부구조형식에 따라서 30m에서 60m가 많이 사용되나 승용차 전용 조립식 고가도로의 경우에는 지간이 30m로 비교적 짧다. 승용차 전용 조립식 고가도로의 교폭은 승용차의 통행만을 고려하여 일반교량보다 좁게 규정하였으며 왕복 4차선의 경우에 충분대와 난간을 포함하여 일반교량 교폭 25m의 약 70%인 17m를 사용하였다.

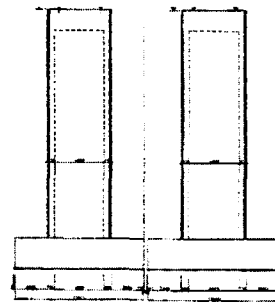
일반 교량의 교각으로는 콘크리트 중공 또는 충실단면을 사용하여 상하행선에 독립된 교각을 사용하거나 문형식이 많이 사용되나 승용차 전용 조립식 고가도로 경우에는 시공성을 고려하여 강재로된 중공 라멘식 교각이 사용되었다. 교각의 강성은 평균적으로 일반 교량의 75%정도 강성을 갖고 있다. 교각 높이는 하부의 차량통행과 여유공간등을 고려하여 최소한의 형하 공간이 확보되는 8m로 가정하였다. 라멘식 강제교각을 사용한 승용차 전용 고가도로와 일반 교량의 교각 개략도는 그림 1과 같다. 승용차 전용 조립식 고가도로는 시공 중 추가적인 용지 매입을 피하고 공사 면적을 최소화하여 공사로 인한 교통혼잡을 줄이고자 기초 단면적을 작게 하고 직접기초를 사용하였다.

표1 일반 교량과 승용차 전용 조립식 고가도로 비교

		일반 교량 (DB 24)	승용차 전용 교량			
상부	형식	PC Box, PSCI교, 강박스 등	소수주형 합성형	PC Box	강상판형	복합재료 거더
	상부중량 (tonf/m')	1.2~1.8	0.89	1.18	0.39	0.26
	차선수	2~4차선	2~4차선			
	경간장	20~60m	30m			
	교폭	25m (왕복4차선+중분대+난간)	17m (왕복4차선+중분대+난간)			
교각 특성	형식	라멘식, T형식 등 (콘크리트교각 충전&중공단면)	라멘식 (강제교각 중공단면)			
	높이	20~40m	8m 이내			
	기둥 크기	1.0~3.0m	1.2~1.8m			
		원형기둥				
기초	형식	직접기초, 우물통기초, 말뚝기초	직접기초			



(a) 승용차 전용 조립식 고가도로



(b) 일반 교량

그림 1 교각 형식 비교

3. 면진설계

지진격리장치를 이용한 면진설계는 구조물의 주기를 길게 만들고 감쇠비의 증가를 통하여 구조물의 내진성능을 증가시키는 방법이다. 일반 교량의 받침 배열을 보면 소수의 교각 위에서 고정지지하고 다른 교각들에서는 교축 방향으로 가동지지로 설계함에 따라 지진발생시 상판에 작용되는 교축 방향의 지진하중을 고정 지지점을 가진 소수의 교각이 모두 감당해야 하는 문제가 발생한다. 따라서 유연성 증가와 에너지 감쇠효과에 의하여 발생하는 수평력을 현저히 감소시킬 수 있으며 모든 교각이 수평지진력을 분담하도록 지진격리받침을 사용한다. 지진격리받침의 기본적인 기능에

는 지진하중응답을 감소시키기 위해서 전체 시스템의 주기를 길게 하기 위한 유연성, 구조물과 지반사이의 상대 변위를 조절하기 위한 에너지 소산능력, 풍하중이나 상시진동 같은 상시 하중에 대하여 탄성거동을 하기 위한 강성 등이 있다.

국내에서 사용되는 지진격리받침으로는 납-고무받침(LRB : Lead Rubber Bearing)과 탄성받침(Elastomeric Bearing)이 있으며 현재까지 콘크리트 교각을 가진 콘크리트 박스나 강 박스에 많이 사용되어 왔으며 승용차 전용 조립식 고가도로와 같은 경량 구조물에 사용 사례는 없다. 지진격리받침의 사용 목적은 일반적인 교량의 경우와 마찬가지로 내진성능 확보에 있으며 추가적으로 도심구간에 건설되는 특성을 감안하여 기초 공사 면적을 최소화하기 위하여 기초 설계를 지배하는 수평지진력을 최소화하는 것이다.

해석 모델은 경간 30m의 5경간 연속교로 그림 2와 같다. 상부구조 형식으로 프리캐스트슬래브와 소수주형의 합성형, PC Box, 강상판형, 복합재료거더로 가정하였으며 4차로 기준 교량폭원 17m를 기준으로 하였다. 상부 구조물의 사하중은 소수주형 합성형 2417톤, PC Box교 3187.8톤, 강판형교 1076톤, 복합재료거더교 709.6톤으로 복합재료의 경우 일반 교량의 24% 정도이다. 교각 형식은 강제 준공 라멘식교각을 사용하였으며 교각 높이는 8m로 가정하였다.

지점조건은 모든 교각에서 고정단인 경우, 탄성받침을 사용한 경우, 납-고무받침을 사용한 경우의 3 경우에 대하여 해석 비교하였다. 표 2는 해석에서 사용된 탄성받침과 납-고무받침 1개의 특성을 보여주고 있다. 복합재료거더의 경우에는 1행선당 4개의 주형이 있어 4개의 받침을 사용하고 그 외의 경우에는 2개의 받침이 사용되었다. 강상판형 및 복합재료거더에 납-고무 받침을 적용하는 경우에는 상부 자중이 일반 교량보다 매우 작아서 통상적으로 생산되는 납-고무받침을 사용할 수 없었으며 받침의 특성을 임의로 가정하였다.

도로교 설계기준에 따라 경기지역으로 가정하여 지진구역계수는 0.11, 위험도계수는 1.4이므로 가속도계수 $A=0.154$ 를 사용하였다. 고정단과 탄성받침의 경우에는 응답스펙트럼해석을 납-고무받침의 경우에는 시간이력해석을 수행하였으며 시간이력해석에서는 3개의 인공지진파로 계산된 평균값을 사용하였다.

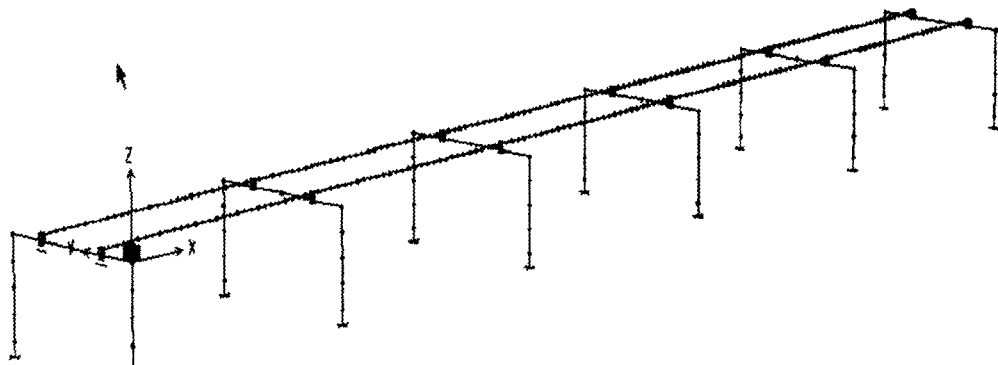


그림 2 해석교량 모델링

표 2 지진격리받침의 특성

상부구조 받침종류		프리캐스트 소수주형합성	PC Box	강상판형	복합재료거더	비고
탄성 받침	압축스프링 계수 (Kv) (tonf/m)	124090	323538	162938	107916	-복합재료 : 거더 4개 (1행선 기준) -그 외 : 거더 2개
	전단스프링 계수 (Kh) (tonf/m)	344.2	803.2	327.8	516.4	
LRB	1차강성(Ku) (tonf/m)	1140.2	2130	684.12	456.08	
	2차강성(Kd) (tonf/m)	104.6	201.4	62.76	41.84	
	수직강성(Kv) (tonf/m)	16519.6	31562.6	9911.76	6607.84	
	Fy (tonf)	12.4509	19.9368	3.5575	7.1148	

4. 해석결과

4가지 상부형식 모두의 경우에서 탄성받침 또는 납-고무받침을 사용하여 지진시 수평력이 크게 감소하였으며 반대로 수평변위는 증가하는 해석결과가 나타났다(표 3 및 표4). Pot 받침을 이용한 고정단의 경우를 기준으로 교축방향 지진에 의하여 교각하단에 발생하는 모멘트와 상부의 교축방향변위를 비교하여 정리하면 다음과 같다.

표 3 프리캐스트 소수주형합성형과 PC Box 해석결과

상부형식		프리캐스트 소수주형합성				PC Box			
		Moment		Displacement		Moment		Displacement	
하중 방향		교축	교축직각	교축	교축직각	교축	교축직각	교축	교축직각
받침 형식	Pot	548.20	531.16	0.02620	0.0168	653.44	683.86	0.03121	0.02132
	탄성받침	289.21 (52.7%)	209.68	0.10524 (401.7%)	0.12045	430.20 (65.8%)	324.66	0.08603 (275.6%)	0.09427
	LRB	111.633 (20.4%)	54.183	0.05424 (207.0%)	0.05722	162.333 (24.8%)	80.247	0.04716 (151.1%)	0.04713

표 4 강상판형과 복합재료거더 해석결과

상부형식		강상판형				복합재료			
		Moment		Displacement		Moment		Displacement	
하중 방향		교축	교축직각	교축	교축직각	교축	교축직각	교축	교축직각
받침 형식	Pot	310.39	246.72	0.01479	0.00765	216.14	169.19	0.01028	0.00527
	탄성받침	172.85 (55.7%)	67.45	0.07103 (280.3%)	0.07573	149.64 (69.2%)	103.47	0.04124 (401.1%)	0.0454
	LRB	50.90 (16.4%)	23.23	0.04974 (336.3%)	0.05512	63.58 (29.4%)	28.96	0.03627 (352.8%)	0.04088

교각하단의 모멘트는 탄성받침을 사용하면 52.7% ~ 69.2%로 납-고무받침을 사용하면 16.4% ~ 29.4%로 감소하고 상부의 변위는 탄성받침을 사용하면 275% ~ 401%로 납-고무받침을 사용하면 151% ~ 352%로 크게 증가하였다. 일반 교량의 경우 같이 지진력은 감소하고 변위는 증가하는 결과를 보여주고 있으며 납-고무받침의 경우가 지진격리효과가 우수한 것으로 나타났다. 상부자중이 매우 가벼운 복합재료거더의 경우에 Pot받침을 이용한 다점고정단의 경우에도 발생하는 모멘트가 216tonf-m로 매우 작아서 별도의 지진격리가 필요치 않을 것으로 판단되나 다점고정단을 사용하면 온도에 의한 상부의 수축과 팽창으로 교각하부에 308.32tonf-m ~ 313.17tonf-m 모멘트가 발생하기 때문에 설계시 매우 불리하다. 상부의 변위는 통상 최소 4cm에서 최대 12 cm로 연장 150m인 교량에 있어서 신축이음부장치가 특별히 커지거나 코핑의 폭이 협소하여 낙교를 예방하기 위한 별도의 장치가 요구되는 수준의 변위는 아니다.

5. 결론

상부자중이 일반 교량의 약 50%정도로 가벼우며 강제교각을 갖는 승용차 전용 조립식 고가도로의 내진설계에 있어서 지진격리받침의 적용성을 검토하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

상부자중에 따라서 수평지진력의 크기가 차이가 있으나 지진격리받침 (납-고무받침, 탄성받침)을 사용하면 구조물의 주기가 길어지면서 수평력이 약 40%이상 감소하지만 지진시 변위는 150%에서 400%까지 크게 증가하고 납-고무받침의 경우가 탄성받침의 경우 보다 수평지진력과 변위가 작은 해석 결과를 보여주고 있어서 납-고무받침의 면진성능이 우수한 것으로 나타났다.

상부자중이 일반교량의 약 50%정도로 작기 때문에 지진 시 교각에 발생하는 수평력이 작아짐으로 소성설계를 하는 일반적인 철근콘크리트 교각의 경우와 같이 교각설계시 특별한 고려가 필요하지 않으며 내진설계에 있어 유리하다.

다만, 시공여건상 면적이 큰 기초를 시공하기 힘들기 때문에 PC Box교와 프리캐스트거더교의 경우에는 지진격리받침을 사용하여 교각에 발생하는 수평지진력의 축소가 가능함으로 이를 이용하여 요구되는 기초의 크기를 줄여 시공성과 경제성을 높일 수 있다. 그리고, 상부가 매우 가벼운

강상판 및 복합재료상판의 경우에는 일반 받침을 사용한 고정단의 경우에도 지진력에 의한 교각 하단의 모멘트가 매우 작으나 상부의 온도 신축을 구속하는 다수의 고정단을 사용함에 따라서 교각하단에 큰 모멘트가 발생하여 구조적으로 불리함으로 지진격리받침을 사용하는 경향이 합리적이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 지원하는 2002년도 건설기술연구개발 사업의 일환으로 세종대학교, 한국도로공사, 두산건설이 공동으로 진행중인 『승용차 전용 조립식 고가도로 건설기술 개발』 과제 (과제번호 : C102A2000005-02A0200-00510)의 일부로서 본 연구가 수행되도록 지원한 기관에 감사드립니다.

참고문헌

1. Buckle, I.G. and Mayes, R.L., "Seismic Isolation: History, Application, and Performance-A World View", Earthquake Spectra, Vol. 6, No. 2, 1990, pp.161~201.
2. 김남식 외, "지진격리장치의 내진성능평가를 위한 실험적 연구", 보고서, 현대건설 기술연구소, 2002.
3. 윤정방, 박동욱, 이동하, 안창모, "교량용 내진받침의 동특성 실험 결과를 이용한 교량의 해석", 춘계학술발표회 논문집, 한국전산구조공학회, 2001, pp465-474.
4. 전귀현 외, "국도상 기존교량의 내진성능 평가 및 보강방안 연구", 보고서, 시설안전기술공단, 2001.
5. 황은성, "LRB 기초분리장치의 교량 내진효과", 대한토목학회논문집, 제13권, 제5호, 1993, pp.13~18.