

L.R.B.를 이용한 면진설계의 내지진 안전성 연구

구 봉 근* · 김 태 봉** · 우 상 익*** · 이 철 희****

* 충북대학교 토목공학과 교수, 공학박사 ** 대덕대학 산업안전과 조교수, 공학박사
*** 충북대학교 대학원 토목공학과 박사과정 **** 충북대학교 대학원 토목공학과 석사과정

I. 서 론

외국의 경우, 지진활동이 활발하지 않은 지역에서 강진이 발생하고, 최근 국내의 빈번해진 지진 발생 등의 이유로 내진설계 기준의 정립 및 강화가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 교량의 내진설계는 다음과 같은 몇 가지 한계점을 가지고 있다.¹⁾ 첫째 내진구조는 짧은 고유주기로 인하여 유발되는 지진력 자체가 매우 크다. 둘째, 설계지진을 능가하는 지진 발생시 구조물이 붕괴될 가능성이 크다. 즉 내진여유도가 작다. 셋째, 내진설계는 설계지진력 이상의 지진의 발생을 완전히 배제하지 않는데, 그러한 지진발생시 지지력이 모두 고정단이 위치한 교각에 집중되어 그 교각의 받침이 파괴되어 설계개념을 상실할 가능성이 높다.

선진국에서는 이를 보완하기 위해 주기상승과 부가적인 감쇠 및 하중 조절(force control)을 이용해 지진력을 효과적으로 줄일 수 있는 면진설계 개념을 도입해 이미 실용화에 이르렀다.²⁾ 그러나, 국내에는 면진설계에 대한 연구 및 설계조항이 부족하고 비선형 시간이력해석을 위한 설계파형이 국내 시방서에 정의되어 있지 않은 관계로 실제 이용에 많은 어려움이 따른다. 따라서, 본 연구에서는 면진설계를 간단하고 합리적으로 할 수 있는 방법을 가지고 납-고무 면진 받침(Lead rubber isolation bearing : L.R.B.)을 이용한 면진설계와 내진설계를 비교해 면진설계의 우수성을 알아보고, L.R.B.의 하중조절기능에 대해 연구하였다.³⁾

II. 설계 및 해석 방법

2.1 면진설계

과거에 관측된 지진파의 특성을 살펴보면 단주기 성분에는 에너지가 많이 포함되어 있으나, 장주기 성분에는 에너지가 많이 포함되어 있지 않다는 것을 쉽게 발견할 수 있다.¹⁾ 즉, 구조물의 고유진동주기를 길게 하면 유발되는 지진력을 상당량 감소시킬 수 있다. 또한, 부가적인 감쇠를 통해서도 지진력을 감소시킬 수 있다. 면진설계(免震設計)는 이 주기상승을 기본개념으로 하는 것으로 지진력이 강한 단주기 대역으로부터 구조물의 고유주기를 벗어나게 함으로써 공진현상을 피하게 하는 것이다. 그러나, 교량의 일반적인 고유주기는 0.3~0.6초에 불과하므로, 탄성고무받침 및 활동 받침과 같은 수평강성이 약한 재료를 사용하여 교량의 고유주기를 인위적으로 길게하는 방법을 이용한다. 그리고 면진구조는 지진

발생시 주기를 상승시키는 역할을 하는 요소 이외에 비선형거동으로 지진력을 감소시키는 감쇠기와 상시 교량의 흔들림을 방지해주는 충격 전달 장치로 구성되어 있다.

2.2 L.R.B.의 구성 및 거동특성

납-고무 면진받침(lead rubber isolation bearing : L.R.B.)은 탄성받침에서 문제가 되었던 큰 수평변위를 억제할 목적으로 탄성받침의 내부에 코아형태의 납을 삽입한 것으로 납의 비선형성을 이용한 댐퍼의 특성과 구조물의 고유진동주기의 장주화 및 충격 전달장치의 기능을 한개의 장치로 간략화한 것이다. L.R.B.는 작용하는 하중의 크기 및 속도에 따라 납의 재료적인 특성과 관계하여 각각 다른 거동을 보이는 것이 큰 특징이다. 이 외에도 납의 재결정온도(20℃)와 고무의 복원력을 이용해 지진 종료 후 상판을 원위치 시키는 기능과 납의 크기를 조절해 특정하부구조에 힘을 적게 전달하는 하중조절기능이 있다.

2.3 해석방법

앞서 언급한 바와 같이 L.R.B.를 이용해 면진설계한 교량은 지진하중 작용시 비선형거동을 하여 설계시 선형탄성응답스펙트럼(linear elastic response spectrum)을 이용할 수 없어 비선형 시간이력해석(nonlinear time history analysis)이 불가피하다. 이것은 L.R.B.의 비선형 거동을 가장 정확하게 예측할 수 있긴 하지만 많은 계산량을 필요로 하며 경험 많은 숙련가를 요하게 되어 이용하는데 많은 어려움이 있다.

따라서, 본 연구에서는 L.R.B. 설계 프로그램인 PC-LEADeR로부터 구한 유효강성과 수정된 비선형 스펙트럼을 가지고 범용 구조해석프로그램인 LUSAS를 이용해 선형탄성해석을 수행하는 간편하고 합리적인 해석방법을 이용하였다.^{4, 5)} 앞으로 국내 표준시방서에 반영될 설계 스펙트럼이 AASHTO의 설계스펙트럼 공식으로 정확히 표현될 수 있으므로 본 연구에서 이용한 방법을 국내 실정에 적용하는데 있어 불합리한 점은 전혀 없다고 할 수 있다.

본 연구에서 이용한 교량모형은 모두 정형교량에 가까우므로 단일모드스펙트럼 해석법을 이용하였으며,^{6, 7)} L.R.B.의 전단특성은 쌍일차 모형(bi-linear model)을 이용하였고, L.R.B.이외의 모든 요소는 탄성거동을 한다고 가정하였다.

III. 해석결과 및 고찰

3.1 해석방법의 증명

D.I.S.사에서 실시한 비선형 시간이력해석 결과(방법 1)를 본 연구에서 이용한 L.R.B.의 설계를 위한 PC-LEADeR와 LUSAS를 병용하여 얻은 결과(방법 2)와 비교해 본 연구에서 이용한 방법의 타당성을 증명해 본다. 대상교량은 3련의 강판형 4경간 연속교로 경간길이는 각각 175(A1-P1), 210, 170, 145ft이며, 교각 높이는 39ft, 지진가속도는 0.6g, 지반종류는 II, 스펙트럼은 Caltran ARS 곡선을

이용했다. 받침설계시 입력하중의 계산 및 하중 그룹은 AASHTO 규정에 의거했다.⁸⁾

Table 1 Comparison of time history with PC-LEADeR & linear elastic result

		Displacement(ft.)				Force(kips)				
		Method ①	Method ②	Method ③*	(①-②)/①	Method ①	Method ②	Method ③*	(①-②)/①	
T r a n s.	A ₁	0.67	0.56	0.75	-16.4 %	229	216.8	286	-5.3 %	
	P ₁	Deck	0.98	0.86	0.74	-12.2 %	397	366.5	325	-7.7 %
		Pier	0.15	0.13	0.12	-15.4 %				
	P ₂	Deck	1.12	0.90	0.74	-19.6 %	445	380.1	325	-14.6 %
		Pier	0.17	0.14	0.12	-17.6 %				
	P ₃	Deck	0.95	0.79	0.74	-16.8 %	380	328.2	325	-13.6 %
		Pier	0.14	0.12	0.12	-14.3 %				
	A ₂	0.48	0.37	0.74	-23.0 %	171	143.1	286	-16.3 %	
	Period(sec)		1.97	1.82						
	Total					1622	1434.7	1547		

* Method③ : by LEAReR only

Table 1과 같이 해석결과는 교축직각방향의 경우, 변위는 최고 23%, 받침 전단력은 16.3% 감소하는 것으로 나타났다. 이런 차이는 PC-LEADeR에서 제공한 L.R.B.의 유효강성이 시간이력해석의 결과와 다소 차이가 나기 때문인 것으로 추측된다. 그러나, 본 연구에서 이용한 방법은 복잡하고 비경제적인 시간이력해석에 비해 절차가 간편하고 시간과 노력을 많이 줄일 수 있으므로 매우 타당한 것으로 생각된다.

3.2 동적설계를 통한 내진설계와 면진설계의 비교

Fig. 1과 같이 L.R.B.가 설치된 교량 모형은 표준도를 토대로, 4련의 강판형

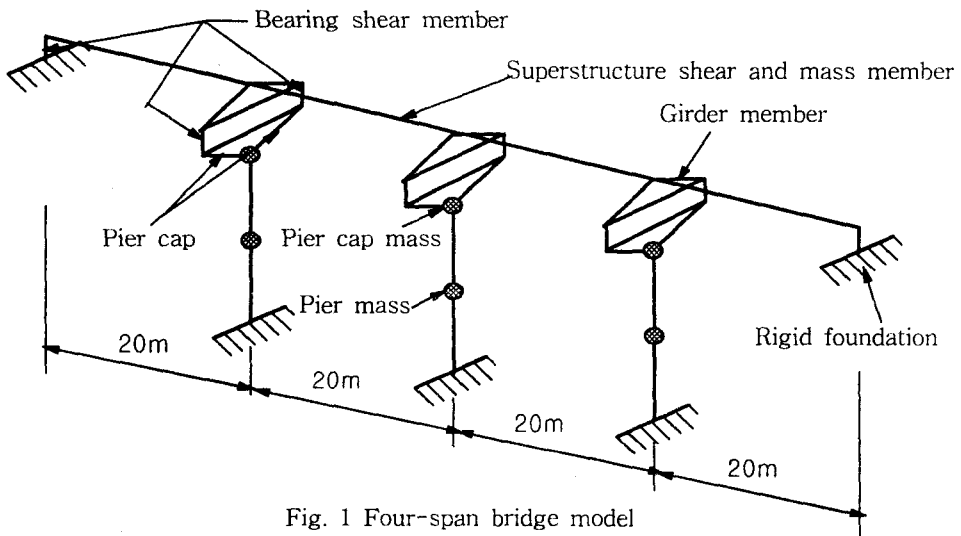


Fig. 1 Four-span bridge model

4경간 연속교로 경간길이는 20m로 모두 동일하며, 교각높이는 9.8m로 한다. 내진설계된 교량모형의 경우, 받침은 중앙교각(P₂)에 고정단을 나머지에 가동단을 설치하였다.

Fig. 2와 같은 탄성 설계 스펙트럼의 결정은 내진설계기준연구(Ⅱ)에 의거한다. 교량의 중요도에 따른 분류는 내진 1등급교로, 내진성능목표는 붕괴방지수준(재현주기 1,000년), 지진구역은 I, 지반종류는 S_c, 지반종류 및 지진구역에 따른 지진계수는 0.18로 가정한다. 해석은 교축 직각 방향에 대해서만 실시하였다.

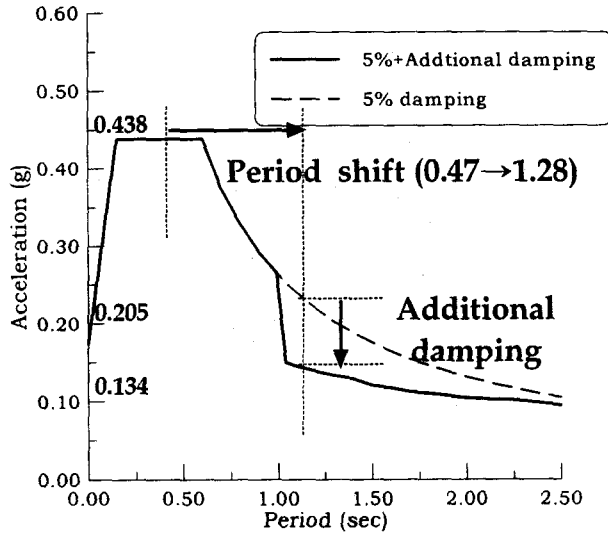


Fig. 2 Elastic and modified nonlinear response spectrum

Table 2는 동일한 조건으로 설계한 내진교량과 면진교량의 교축직각방향에

Table 2 The comparison of elastic force in seismic and seismic isolation design

	Displacement(cm)		Force(t)					
	LEADeR	Isolation	LEADeR	Isolation	Conv.	Isolation /R	Conv./R	
A ₁	5.25	5.5	16.8	17.5		17.5		
P ₁	Deck	5.25	5.6	20.4	20.8		20.8	
	Pier	1.27	1.5					
P ₂	Deck	5.25	5.7	20.4	21.0	306.5	21.0	306.5
	Pier	1.27	1.5					
P ₃	Deck	5.25	5.6	20.4	20.8		20.8	
	Pier	1.27	1.5					
A ₂	5.25	5.5	16.8	17.5		17.5		
Total			94.8	97.6	306.5	97.6	306.5	
Base shear			20.4	25.15	306.5	8.4	102.2	
Base moment (t·m)			200.0	217.4	3534.0			
Period(sec)			1.24	1.28	0.47			
Period shift : 0.49 sec			Additional damping : 6.6 %					

대한 각 부재응답결과를 비교한 것이다. 교량모형의 탄성고유주기는 0.79sec로 주기상승은 0.49 sec이고 부가적인 감쇠는 6.6 %로 나타났다. 면진받침의 설계력(21t)은 내진설계된 교량의 받침 설계력(306.5t)의 1/15 정도이며, 면진설계된 교량의 교각 설계력은 반응 수정계수(R)를 1로 했을 때(교각의 탄성응답보장)는 약 1/4 정도이고, R 을 3(單柱)으로 했을 때는 1/12로 나타났다. 교각머리부 및 교각의 질량이 교각 기초부에 발생시키는 전단력은 5.53 t, 모멘트는 19.6 t·m로 나타났다.

3.3 L.R.B.의 하중 조절 기능

L.R.B.의 하중 조절 기능을 알아보기 위해 받침을 Table 3과 같이 네 가지 경우로 배열하였다. 경우 1은 모든 받침을 L.R.B.로 한 것으로, 이것의 결과는 다른 경우의 결과와 비교되는 기준이 된다. 경우 2 및 경우 3은 각각 9.8m 중앙교각(P_2) 및 5m 교대측 교각(P_1, P_3)이 위치한 지반이 매우 연약하다는 가정하에, 그 교각에 작용하는 지진력을 최소화하기 위해 탄성받침을 배열하고, 나머지 모든 하부구조에 L.R.B.를 배열한 것이다. 경우 4는 모든 하부구조에 탄성받침만을 배열한 것이다.

Table 3 Response on arrangement of L.R.B and elastomeric bearings

	Abut. 1		Pier 1			Pier 2			Pier 3	Abut. 2
		B		S	M		S	M		
Case 1	L.R.B.	16.39	L.R.B.	22.7	89.58	L.R.B.	21.15	182.7	L.R.B.	L.R.B.
Case 2	L.R.B.	17.39	L.R.B.	25.93	102.3	Elasto.	10.22	88.29	L.R.B.	L.R.B.
Case 3	L.R.B.	22.97	Elasto.	11	43.9	L.R.B.	31.52	272.9	Elasto.	L.R.B.
Case 4	Elasto.	17.56	Elasto.	23.98	94.68	Elasto.	20.61	179.2	Elasto.	Elasto.

B: Bearing shear force (t), S: Pier base shear force (t). M: Pier base moment (t·m)

Table 3과 같이 경우 2는 중앙교각(P_2)의 기초부에 발생하는 전단력 및 모멘트가 경우 1에 비해 52% 감소했고, 반면에 1, 3번 교각 기초부에 발생하는 전단력 및 모멘트는 14%정도 증가했다. 또한 경우 3은 1, 3번 교각 기초부에 발생하는 전단력 및 모멘트는 51%정도 증가한 반면, 중앙교각(P_2)의 기초부에 발생하는 전단력 및 모멘트는 49%정도 증가했다. 이와같이 L.R.B.는 기초부가 취약한 교각의 전단력 및 모멘트를 다른 하부구조에 분배해 그것을 효과적으로 감소시킴으로서 하중 조절능력이 탁월함을 알 수 있었다.

IV. 결 론

1. PC-LEADeR와 선형탄성해석 프로그램을 이용해서 얻은 결과는 비선형 시간이력해석을 수행해 얻은 결과와 변위의 경우 최대 23%, 최소 5%, 전단력의 경우 최대 19%, 최소 3.2%의 차이를 보임으로써 본 연구에서 이용한 방법이 타당함을 알 수 있었다.

2. 동일한 교량을 면진설계했을 경우 내진설계했을 때보다 받침의 설계력은 1/15, 교각의 설계력은 소성변형을 허용했을 때는 1/12, 탄성응답을 보장할 때는 1/4까지 줄일 수 있어 L.R.B.를 이용한 교량설계시, 경제성과 우수한 내지진성능 모두를 동시에 만족할 수 있을 것으로 생각된다.

3. 탄성받침과 L.R.B.를 적절히 조합하면 교각들 사이에 혹은 교대와 교각들 사이에 지진력을 효과적으로 분배시킬 수 있다.

본 연구를 통해 기존의 내진설계에 비해 면진설계법이 보다 합리적이라는 것을 확인할 수 있었으며, 앞으로 L.R.B.의 해석모형에 대한 연구가 이루어져야 하고, 면진설계를 위한 방안들이 조속히 마련되어야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. 유니슨건설(주), "교량구조물의 내진설계 및 면진설계", pp. 167~201, 1997.
2. AASHTO, "AASHTO Guide Specifications for Seismic Isolation Design", pp. 7~9, 1991. 6.
3. Turkington, D. H., "Seismic Design of Bridges on Lead Rubber Bearing", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 115, No 12, pp. 3000~3016, 1989.
4. D.I.S., "LEADeR User's Guide", pp. 4-1~4-7, 1994. 8.
5. FEA-United Kingdom, "LUSAS User Guide", pp. 61~297, 1997. 1.
6. AASHTO, "AASHTO Guide Specifications for Seismic Design of Highway Bridge", pp. 1~19, 1983.
7. 건설교통부, "도로교 표준시방서", pp. 759~817, 1996.
8. AASHTO, "AASHTO Standard Specifications for Highway Bridge", pp. 3-1~3-21, 1983.