

## 납-면진받침을 이용한 교량의 면진설계

### Seismic Isolation Design for Bridges on Lead-Rubber Bearings

이 철 회\*      구 봉 근\*\*      전 규 식\*\*\*      이 병 진\*\*\*\*  
Lee, Cheol-Hee      Koo, Bong-Kun      Jeon, Gyoo-Shick      Lee, Byeong-Jin

---

#### ABSTRACT

The concept of seismic design was induced in our country which was poor in it for the scarcity of recognition and insufficiency of funds. Recently, many specialists are enforcing the provisions of seismic design. But because seismic force of seismic design is very great and all the seismic force are concentrated on the fixed bearings and substructure, the bearings are destroyed, so that seismic design lose its basic concept. In addition, when the earthquake which exceeds seismic design force takes place, the bridge is collapsed.

For these reasons, the developed seismic isolation design concept was appeared which diminishes seismic force itself by period shift and additional damping, distributes it to each superstructures evenly.

Therefore, this study introduced the method which combines PC-LEADeR(design program for L.R.B.) with SAP 2000(linear elastic analysis) and performs the seismic isolation design more elaborately and simply, verified the propriety of that method, and examined the force control of L.R.B.

---

#### 1. 서    론

중국의 당산지진 및 일본의 고베지진과 같이 지진활동이 그다지 활발하지 않은 지역에서 강진이 발생하여 적지않은 인명 및 재산피해를 가져온 외국의 사례가 종종 있었으며, 한반도도 결코 지진의 안전지대가 아니라는 학계의 발표를 뒷받침하는 비록 중소규모의 지진이기는 하지만, 지진 발생이 과거에 비해 다소 빈번해진 것이 사실이다. 70년대 후반 원자력발전소의 건설을 통한 내진 설계 개념의 도입을 시작으로, 교량구조물에 대한 내진설계 규정이 1992년에 개정된 도로교 표준시방서에 처음으로 도입되고, 1999년에는 설계기준이 좀더 강화되고 체계적으로 세분화되었다. 그러나 교량의 강성으로 지진력에 대항하고자 하는 교량의 내진설계는 다음과 같은 몇 가지 한계점

---

\* 유니슨건설(주) 주임

\*\* 충북대학교 토목공학과 교수, 공학박사

\*\*\* 유니슨건설(주) 기술이사, 공학박사, 정회원

\*\*\*\* 유니슨건설(주) 부장, 정회원

을 가지고 있다. 첫째 내진구조는 짧은 고유주기로 인하여 유발되는 지진력 자체가 매우 크다. 둘째, 고베지진의 피해사례로부터 알 수 있듯이, 내진구조는 경제성의 문제로 내진여유도가 작기 때문에 설계 지진을 능가하는 지진 발생시 구조물이 붕괴될 가능성이 크다. 셋째, 기존의 금속형 교량받침을 사용하는 경우에는 교축방향의 지진력에 대하여 모두 고정단이 위치한 교각에 집중되므로, 하부구조 및 기초 파일에 대한 공사비가 증가하는 경향이 있다. 이와 같은 내진설계의 문제점을 극복하기 위해, 미국, 뉴질랜드, 유럽의 여러 국가에서는 교량받침을 이용한 장주화 및 감쇠기능을 갖추고, 또한 각 교각에 지진하중을 배분하는 하중 조절기능(Force Control)을 이용해 지진력을 효과적으로 줄일 수 있는 면진설계 개념을 도입해 이미 실용화에 이르렀다. 그러나, 국내에는 면진설계에 대한 설계조항이 정립되어 있지 못하며, 또한 교량받침의 비선형성을 해석하기 위한 설계파형이 국내 시방서에 정의 되어 있지 않은 관계로 실제 적용에 많은 어려움이 따른다. 따라서, 본 연구에서는 비선형 시간이력해석을 대신하여 면진설계를 간단하고 합리적으로 수행할 수 있는 방법을 소개하고, 납-면진 받침(Lead Rubber Bearing : L.R.B.)을 이용한 면진설계와 기존의 내진설계를 비교해 면진설계의 우수성에 대해 알아보고, 마지막으로 L.R.B.의 하중조절기능에 대해 연구하였다.

## 2. 설계 및 해석 방법

### 2.1 면진설계

과거에 관측된 지진파의 특성을 살펴보면 단주기 성분에는 에너지가 많이 포함되어 있으나, 장주기 성분에는 에너지가 많이 포함되어 있지 않으므로 구조물의 고유진동주기를 길게 하면 유발되는 지진력을 상당량 감소시킬 수 있다. 그러나, 주기가 길어지게 되면 상대적으로 변위가 증가하게 되며, 구조물의 기능적인 측면에서 불리한 과대변위는 부가적인 감쇠를 통해 억제하는 것이 바람직하다. 즉, 면진설계(免震設計)는 구조물의 장주기화 및 부가적인 감쇠를 기본개념으로 하여 지진력이 강한 단주기 대역으로부터 구조물의 고유주기를 벗어나게 함으로써 공진현상을 피하게 하는 것이다. 교량상판을 지지하기 위한 일반적인 형상의 교각을 갖는 교량의 고유주기는 0.3~0.6 초에 불과하므로, 탄성고무받침 및 활동 받침과 같은 수평강성이 약한 재료를 사용하여 교량의 고유주기를 인위적으로 길게하는 방법을 이용한다. 면진구조는 지진 발생시 주기를 상승시키는 역할을 하는 장치 이외에 비선형거동을 통하여 지진력을 감소시키는 감쇠기능과 상시에 교량의 흔들림을 방지해주는 Trigger기능을 갖고 있는 것이 이상적이다.

### 2.2 L.R.B.의 구성 및 거동특성

납-면진받침(Lead Rubber Bearing : L.R.B.)은 탄성받침에서 발생할 수 있는 큰 수평변위를 억제할 목적으로 탄성받침의 내부에 코아형태의 납을 삽입한 것으로 납의 비선형성을 이용한 에너지 흡수능력과 차량제동하중 및 풍하중과 같은 상시하중에 대하여 변위를 억제하는 Trigger기능을 한개의 장치로 간략화한 것이다. 즉, L.R.B.는 납의 재료적인 특성으로 작용하는 수평하중의 크기 및 작용속도에 따라 납의 재료적인 특성과 관계하여 각각 다른 거동을 보이는 것이 큰 특징이라 할 수 있다. 또한 L.R.B.는 고무의 복원력을 이용해 지진 종료 후 상판을 원위치 시키는 기능을 가지고 있으며, 상온에 가까운 납분자의 재결정온도(20℃)로 인하여 지진을 경험한 교량의 추

가적인 보수나 처리가 필요없게 된다. 그리고 각 교각의 지반특성에 따라 남의 크기를 조절해 특정하부구조에 힘을 적게 전달하는 하중조절기능을 겸비하고 있다.

### 2.3 해석방법

앞서 언급한 바와 같이 L.R.B.를 이용한 면진교량은 교량은 지진하중 작용시 비선형거동을 하므로, 기존의 내진교량 설계시 많이 이용되어 왔던 탄성응답스펙트럼(Elastic Response Spectrum)을 적용할 수 없으며, 비선형 시간이력해석(Nonlinear Time History Analysis)이 불가피하다. 그러나 이러한 시간이력해석은 특정과형에 대해서는 구조물의 거동을 가장 정확하게 예측할 수 있긴 하지만, 설계스펙트럼을 만족하더라도 과형의 포락특성에 따라 응답에 차이가 발생하므로 경험 많은 숙련가를 요하게 되어 실제 설계에 이용하는데 많은 어려움이 있다.

따라서, 본 연구에서는 L.R.B. 설계 프로그램인 PC-LEADeR로부터 구한 유효강성과 수정된 비선형 스펙트럼을 가지고 범용 구조해석프로그램인 SAP 2000을 이용해 선형탄성해석을 수행하는 간편하고 합리적인 해석방법을 이용하였다. 본 연구에서 사용한 모델을 구성하는 여러 요소 중 L.R.B.만이 비선형 거동을 하고 나머지 모든 요소는 탄성거동을 하며, 지반과 구조물의 상호작용에 의한 효과는 없다고 가정하였다. 그리고 L.R.B.의 전단특성을 표현하기 위해 탄소성 모형(Bi-Linear Model)이 이용되었다.

## 3. 해석결과 및 고찰

### 3.1 해석방법의 타당성 증명

SAP 2000 NONLINEAR를 이용한 비선형 시간이력해석 결과를 본 연구에서 이용한 L.R.B.의 설계를 위한 PC-LEADeR와 SAP 2000 LINEAR를 병용하여 얻은 결과와 비교하여, 본 연구에서 이용한 방법의 타당성을 증명해 본다. 대상교량은 그림-1과 같은 4련의 강판형 3경간 연속교로 경간길이는 각각  $43(P_1-P_2)$ , 50, 44m이며, 교각 높이는 15m, 지진가속도는 0.14g, 지반종류는 I, 스펙트럼은 도로교 표준시방서의 설계스펙트럼 곡선을 이용했다. 받침설계는 L.R.B.설계 프로그램인 PC-LEADeR를 이용했다.

표-5와 같이 해석결과로부터 변위는 교축방향의 경우 평균 26%, 교축직각방향의 경우 49%, 받침 전단력은 교축방향의 경우 3%, 교축직각방향의 경우 5% 정도의 차이가 나타남을 알 수 있다. 이런 차이는 PC-LEADeR에서 제공한 L.R.B.의 유효강성과 감쇠비가 실제와 다소 차이가 나며, PC-LEADeR가 해석시 상판을 강체로 보고 교각의 질량을 고려하지 않는 등의 몇 가지 기본가정을 전제로 하기 때문인 것으로 추측된다. 그리고 PC-LEADeR에 의한 결과들이 시간이력해석에 의한 결과보다 대체적으로 크게 나타나는데, 이것은 시간이력해석시 5개의 모드에 대한 값을 참여 질량비에 따라 중첩한 반면, PC-LEADeR는 해석시 1번 및 2번 Mode의 참여 질량비를 100%라고 보았기 때문이다. 즉 PC-LEADeR에 의한 값은 다소 안전측이라 할 수 있다. 이런 측면들을 종합해 볼 때, 본 연구에서 이용한 방법은 다소 복잡하고 입력과형의 포락형태가 응답에 지배적인 영향을 미치는 시간이력해석에 비해 절차가 간편하며 시간과 노력을 많이 줄일 수 있으므로 타당한 것이라 생각된다.

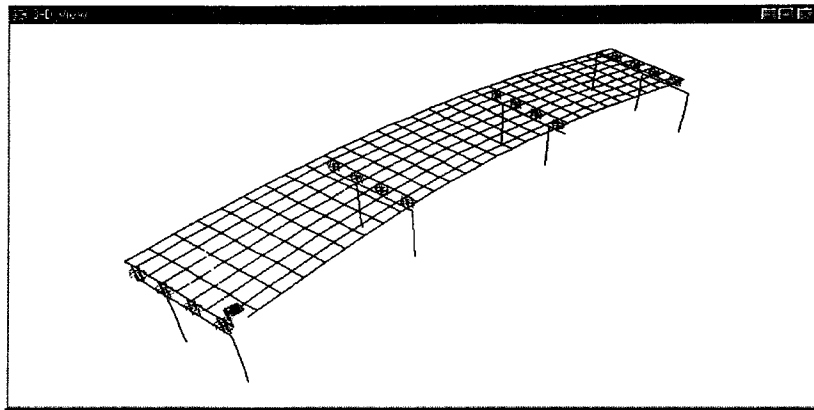


그림-1 해석에 이용된 교량의 모델링

표-1 L.R.B 설계 제원 및 비선형 특성

교각 번호	설계 제원				비선형 특성			
	평면치수	남심지름	고무층수	유효강성	$K_v$	$K_e$	$F$	$K_p$
1	62.2	11	10	5.48/5.04	1662	19.61	8.13	2.17
2	95.2	13	10	7.48/7.41	4019	31.13	11.43	3.61
3	95.2	13	10	7.48/7.41	4019	31.13	11.43	3.61
4	62.2	11	10	5.48/5.04	1662	19.61	8.13	2.17

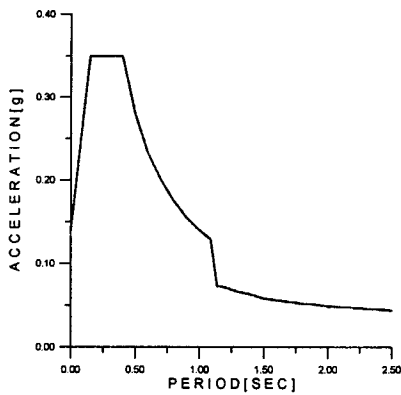


그림-2 수정된 비선형 응답스펙트럼

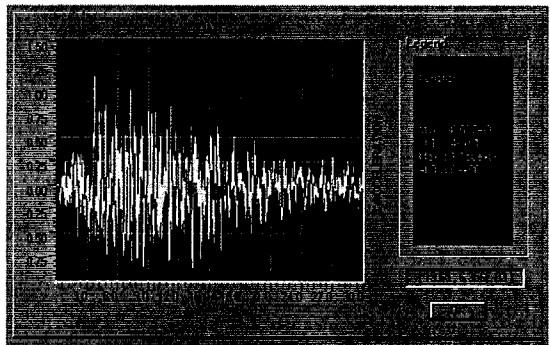


그림-3 AASHTO 0.14g S-1의 인공지진파형

표-2 고유치 해석결과

모드번호	고유주기(T)	고유진동수(Hz)	질량참여계수		비고
			X	Y	
1차모드	1.44	0.70	79.94	0.007	교축방향 병진모드
2차모드	1.18	0.85	0.016	69.43	교축직각방향 병진모드
3차모드	1.00	1	0.82	0.084	상판의 회전모드
4차모드	0.46	2.16	0.026	0.03	상판의 회전모드
5차모드	0.46	2.17	0.003	0.15	교각만의 병진모드

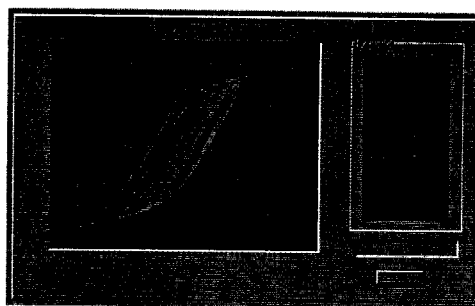
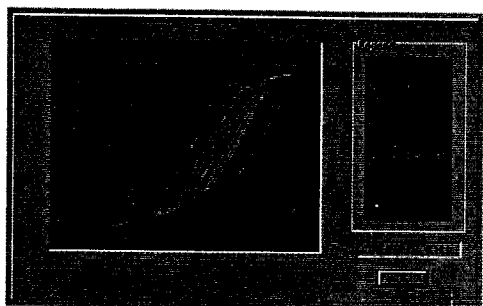


그림-4 1번 교각에 놓인 L.R.B.의 전단력-변위 시간이력(교축 및 교축직각방향)

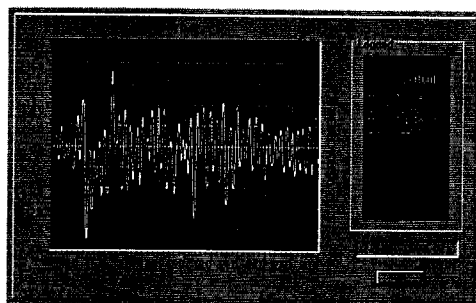
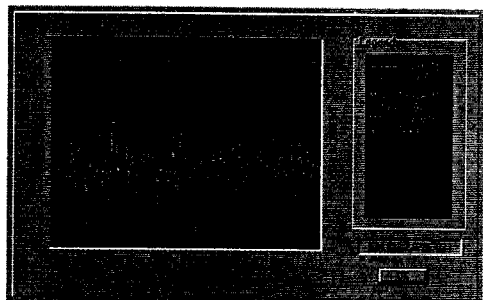


그림-5 1번 교각에 놓인 L.R.B. 상·하단에서의 변위시간이력(교축 및 교축직각방향)

표-3 교축방향에 대한 받침의 변위 및 전단력

	DISPLACEMENT(cm)			SHEAR FORCE(t)		
	TIME HIST.	LEADeR & Linear Elastic	LEADeR	TIME HIST.	LEADeR & Linear Elastic	LEADeR
P <sub>1</sub>	1.62	1.9 (*1.2)	2.2	10.5	10.2	12
P <sub>2</sub>	1.81	2.0 (*1.1)	2.6	16.4	15.2	19.5
P <sub>3</sub>	1.84	2.0 (*1.1)	2.6	16.1	14.5	19.5
P <sub>4</sub>	1.9	2.0 (*1.3)	2.2	11.2	10.9	12
PERIOD		1.4	1.37			
SUM				54.2	50.8	63

\* Pier Copping부에서의 변위

표-4 교축직각방향에 대한 받침의 변위 및 전단력

	DISPLACEMENT (cm)			SHEAR FORCE (t)		
	TIME HIST.	LEADeR & Linear Elastic	LEADeR	TIME HIST.	LEADeR & Linear Elastic	LEADeR
P <sub>1</sub>	1.5	2.1 (*0.4)	2.5	14.7	10.8	12.7
P <sub>2</sub>	1.55	2.2 (*0.4)	2.7	15.5	16.7	19.7
P <sub>3</sub>	1.53	2.2 (*0.3)	2.7	15.4	16.3	19.7
P <sub>4</sub>	1.4	2.0 (*0.3)	2.5	10.2	9.9	12.7
PERIOD		1.18	1.37			
SUM				55.8	52.9	64.8

\* Pier Copping부에서의 변위

표-5 시간이력해석법을 기준으로 한 각 방법의 정확도 비교

	LONGITUDINAL			TRANSVERSE		
	TIME HIST.	LEADeR & Linear Elastic	LEADeR	TIME HIST.	LEADeR & Linear Elastic	LEADeR
Bearing Displ.	100 %	112 %	134 %	100 %	142 %	174 %
Bearing Force	100 %	94 %	116 %	100 %	95 %	116 %

### 3.2 동적설계를 통한 내진설계와 면진설계의 비교

표-6은 동일한 조건으로 설계한 내진교량과 면진교량의 교축 및 교축직각방향에 대한 각 부재응답결과를 비교한 것이다. 교축방향의 경우, 교량모형의 고유주기는 1.1sec로 주기상승은 0.34 sec이고, 교축직각방향의 경우, 고유주기는 0.7sec로 주기상승은 0.48sec로 나타났다. 교축직각방향의 경우 3번 교각에 놓인 면진받침의 설계력(123/8 = 15.4t)은 내진설계된 교량의 받침 설계력(567/8 = 70.9t)의 1/5 정도이며, 면진설계된 교량의 교각 설계력은 탄성응답 보장시는 내진교량과 거의 같고 반응

표-6 교축직각방향에 대한 내진교량과 면진교량의 설계력 비교

		Longitudinal				Transverse			
		Displacement(cm)		Force(t)		Displacement(cm)		Force(t)	
		Conv	Isolation	Conv	Isolation	Conv.	Isolation	Conv.	Isolation
P <sub>1</sub>	Deck	11.3	2.8			3.2	1.77		
	Pier Copping	2.3	1.2	0	84	3.2	0.27	414	118
P <sub>2</sub>	Deck	11.2	2.8			2.1	1.78		
	Pier Copping	11.2	1	480	131	2.1	0.23	480	124
P <sub>3</sub>	Deck	11.3	2.9			2.1	1.69		
	Pier Copping	4.6	1.1	0	129	2.1	0.16	567	123
P <sub>4</sub>	Deck	11.3	2.9			2.6	1.59		
	Pier Copping	3.2	1	0	90	2.6	0.19	280	82
Period(sec)				2.3	1.4			0.6	1.2

수정계수( $R=2.5$ ) 적용시는 1/2.5로 나타났다. 면진교량의 경우 반응수정계수를 이용하지 않더라도 받침부, 교각과 기초 연결부, 기초부(경사말뚝인 경우)에서 내진교량에 비해 공사비를 절감할 수 있으므로, 안전성과 경제성을 동시에 제공하는 것이 가능하다.

### 3.3 L.R.B.의 하중 조절 기능

L.R.B.의 하중 조절 기능을 알아보기 위해 받침을 표-7과 같이 네 가지 경우로 배열하여 교축직각 방향에 대한 해석을 실시하였다. 경우 1은 모든 받침을 L.R.B.로 한 것으로, 이것의 결과는 다른 경우의 결과와 비교되는 기준이 된다. 경우 2 및 경우 3은 각각 중앙의 두 교각( $P_2, P_3$ ) 및 단부의 두 교각( $P_1, P_4$ )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.

표 7과 같이 경우 2는 중앙의 두 교각( $P_2, P_3$ )의 기초부에 발생하는 전단력 및 모멘트가 경우 1에 비해 59% 감소했고, 반면에 1, 4번 교각 기초부에 발생하는 전단력 및 모멘트는 42%정도 증가했다. 또한 경우 3은 1, 4번 교각 기초부에 발생하는 전단력 및 모멘트는 67%정도 감소한 반면, 단부 두 교각( $P_2, P_3$ )의 기초부에 발생하는 전단력 및 모멘트는 44%정도 증가했다. 한편 경우 4는 탄성받침의 수평강성이 매우 작아 고유주기가 1.6sec나 되어 유발되는 지진력이 매우 작았다. 하지만 부가적이 감쇠가 없으므로 받침에 작용하는 전단력은 경우 1에 비해 25~79%정도 크게 나타났다으며, 변위 또한 최대 7.5cm나 발생했다. 이와같이 L.R.B.는 기초부가 취약한 교각의 전단력 및 모멘트를 다른 하부구조에 분배해 그것을 효과적으로 감소시킴으로서 하중 조절기능이 뛰어난 것을 알 수 있었다.

표-7 L.R.B.와 탄성받침 배열에 따른 응답

	Pier 1		Pier 2		Pier 3		Pier 4					
	S	M	S	M	S	M	S	M				
Case 1	L.R.B.	118	1770	L.R.B.	124	1860	L.R.B.	123	1845	L.R.B.	82	1230
Case 2	L.R.B.	168	2520	Elasto.	51.2	768	Elasto.	52	780	L.R.B.	168	2520
Case 3	Elasto.	38.4	576	L.R.B.	179.2	2688	L.R.B.	180	2700	Elasto.	38.4	307.2
Case 4	Elasto.	148	2220	Elasto.	222.4	3336	Elasto.	219.2	3288	Elasto.	145.6	2187

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

#### 4. 결 론

1) PC-LEADeR와 탄성해석 프로그램을 이용해서 얻은 결과는 비선형 시간이력해석을 수행해 얻은 결과와 비교하여, 변위의 경우 교축방향은 10%, 교축직각방향은 40%정도 크게 발생하였으나, 설계의 측면에서는 안전측의 결과이며, 전단력의 경우 교축은 6%, 교축직각은 5%의 차이를 보임으로써 본 연구에서 이용한 방법이 타당함을 알 수 있었다.

2) 동일한 교량을 면진설계했을 경우 내진설계했을 때보다 받침의 설계력은 1/5, 반응수정계수를 이용했을 때는 교각의 설계력을 1/2.5까지 줄일 수 있으며, 탄성응답을 보장할 때도 교각-기초 연결부 및 기초부(경사말뚝)등에서 하부구조의 공사비를 절감할 수 있어 L.R.B.를 이용한 교량설계시, 경제성과 우수한 내진성능 모두를 동시에 만족할 수 있을 것으로 판단된다.

3) 탄성받침과 L.R.B.를 적절히 조합하면 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. AASHTO, "AASHTO Guide Specifications for Seismic Design of Highway Bridge", pp. 1~19, 1983.
6. 건설교통부, "도로교 표준시방서", pp. 759~817, 1996.
7. AASHTO, "AASHTO Standard Specifications for Highway Bridge", pp. 3-1~3-21, 1983.