

납면진장치의 위치변화에 따른 면진교량의 동특성

Dynamic Behaviors of Seismically Isolated Bridges According to Different Location of Lead Rubber Bearings

박정근* 전규식** 이철희***

Park, Jeung-Geun Jeon, Gyoo-Shick Lee, Chul-Hee

ABSTRACT

The purpose of this paper is to investigate dynamic characteristics of an isolated bridge with a different location of seismic isolation at piers and to determine the best location of seismic isolation. The substructure of the bridge is two column framed type reinforced concrete and has relatively high piers, so it has long natural period. To decide the best location of seismic isolation, displacement, shear force, bending moment, acceleration and absorbed energy are compared using fast nonlinear analysis. To isolate overall structures is effective to bending moments and shear forces for long period bridges.

1. 서론

면진화된 교량은 면진화된 건축물과는 다르게 상부구조와 하부구조로 나누어져있고 교각의 강성의 영향, 안전성을 위한 상부구조의 변위에 대한 충분한 고려의 필요성, 고차 모드의 영향 등 건축구조물에서는 볼 수 없는 구조적 거동과 설계에 필요한 요구 조건들이 있고 이들 동적 특성들을 정확히 파악하여 설계에 반영하는 것은 중요한 과제라고 할 수 있다. 본 논문에서는 특히 교각이 높은 경우의 납면진장치의 설계와 설치 위치에 따른 동적 특성을 파악 후 선정교량에 대한 적합한 면진위치를 판단한다.

2. 해석방법

해석에 사용된 범용 유한요소 프로그램은 SAP2000 으로서 적은 수의 비선형 요소를 가질 경우 비선형 해석시 선형해석과 거의 같은 속도로 계산이 가능한 빠른 비선형 해석 (FNA) 알고리즘을 가지고 있고 본 모델의 비선형 해석을 위해 사용되었다. FNA는 선형 또는 비선형 구조시스템의 정 혹은 동해석에 적용되고 있다. 비선형 요소의 힘은 각 시간 혹은 하중 단계의 끝에서 반복에 의해 계산 되어진다. 비연성 모드 방정식은 각 시간 증분에 대하여 정확하게 풀어진다. 시간 t에 있어서 비선형 또는 에너지 흡수 요소를 가진 탄성 구조물의 전체 동적평형 방정식은 다음과 같은 형태가 된다.

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) + R(t)_N = R(t) \tag{1}$$

* 유니슨산업주식회사 기술개발본부 과장, 공학박사
** 유니슨산업주식회사 기술개발본부 본부장, 공학박사
*** 유니슨산업주식회사 기술개발본부 주임

M:질량 매트릭스 C:비례감쇠 매트릭스 K:강성 매트릭스 $u(t)$: 가속도 $\dot{u}(t)$: 속도 $u(t)$: 변위 $R(t)_N$: 전체절점벡터

제한된 비선형 요소수를 가진 구조시스템의 해는 다음과 같이 요약되어진다. 식(1)의 해에 있어서 첫번째 스텝은 대각 Ritz 벡터, Φ , "m"의 조합을 계산한다. Φ 는 다음의 방정식을 만족한다.

$$\Phi^T M \Phi = I \quad \text{그리고} \quad \Phi^T M \Phi = \Omega^2 \quad (2)$$

여기서 I는 단위 매트릭스이고 Ω^2 은 대각 매트릭스로 ω_m^2 으로 정의 되어진다. 계의 응답은 다음의 행렬변환 도입에 의하여 이들 벡터의 항으로 표현 될 수 있다.

$$u(t) = \Phi Y(t) \quad \dot{u}(t) = \Phi \dot{Y}(t) \quad \ddot{u}(t) = \Phi \ddot{Y}(t) \quad (3)$$

식(1)에서의 이들 방정식들의 치환과 Φ^T 에 의한 방정식의 양변의 곱에 의해 다음식의 형태로 된다.

$$I \ddot{Y}(t) + \Lambda \dot{Y}(t) + \Omega^2 Y(t) = F(t) + F(t)_N \quad (4)$$

여기서 선형, 비선형 모달 힘은 아래와 같이 주어진다.

$$F(t) = \Phi^T R(t) \quad F(t)_N = \Phi^T R(t)_N \quad (5)$$

3. 해석모델

해석대상교량은 전장이 549.55m 이고 중간에 2개의 기둥을 가진 철근 콘크리트 교각이 5개인 6경간 연속 테크 프레임 강 박스 거더교량으로 최대 스패 100m의 비교적 높은 교각을 가진 교량이다. 최대 교각의 높이는 25.507m으로 이것은 비교적 높은 교각에 해당되며 지진응답에 있어서 고차모드의 영향이 있을 것으로 생각되어 진다.

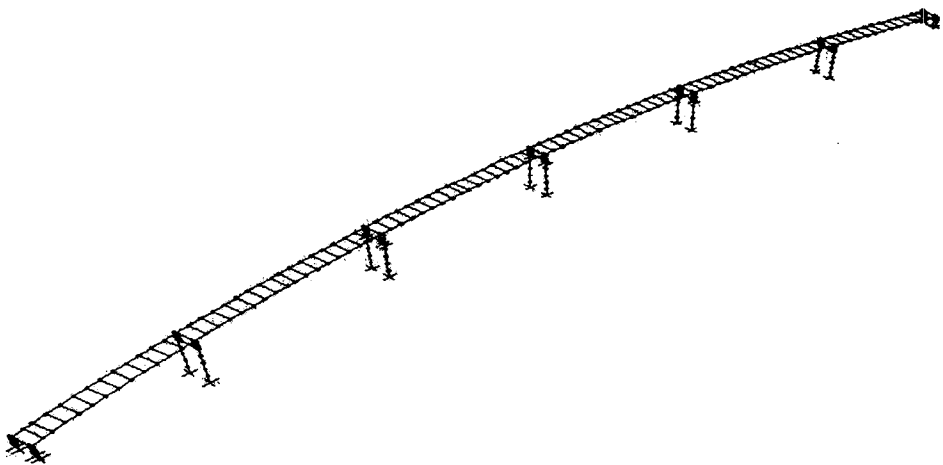


그림 1 해석모델

4. 납면진장치 설계

설계개념

본 해석에 사용된 금호대교는 1996년 개정된 도로교표준시방서의 내진설계편을 따라 내진기준이 설정되었다. 행정구역상 대구광역시로 분류되어, 지진구역 I에 해당되므로 가속도 계수 0.14를 적용하였으며, 지반조사를 실시해 지반종류를 II로 결정하였다.

본 논문에서는 지진파형의 포락특성은 Loma Prieta Corralitos 지진기록과 비슷한 형태를 유지하면서 지진파형의 가속도 및 주파수 특성은 위에서 언급한 설계스펙트럼을 만족하도록 진폭 및 주파수 조절된 인공지진파를 이용한 비선형 시간이력 해석을 실시하였다.

납면진받침의 설계는 다음과 같은 두 가지 설계조건을 동시에 만족하도록 이루어진다.

첫째, 면진장치는 상시 교량에 작용하는 사하중과 활하중과 같은 수직방향 하중을 지지하는 능력을 가져야 한다. 그리고 풍하중(교축직각방향), 차량의 제동하중이나 원심하중(교축방향)과 같은 수평방향 하중으로 인해 받침에 손상이 가서는 안되며, 더 나아가 과도한 수평변위가 발생하여 교량의 사용성이 저하되어서는 안된다. 또한 온도신축 및 활하중에 의한 상판의 처짐에 따른 받침의 이동량을 수용할 수 있어야 한다. 위의 사항들은 받침의 허용응력 및 수직, 전단, 회전에 의한 고무의 국부전단변형율이 파단시 연신율을 넘지 않는다는 설계기준에 의해 확인된다.

둘째, 내진교량의 고유주기는 약 0.8초로 해석에 이용된 인공지진파의 주기와 공진을 일으켜 응답이 매우 커지므로, 면진장치 설계시 이러한 공진현상을 피할 수 있도록 하였다. 구체적으로 지진시 받침에 발생하는 수평력을 사하중의 10% (내진교량에 이용된 포트받침의 마찰계수 : 0.1) 이하로 감소시키기 위해 비면진교량의 주기의 약 2배 이상을 목표주기로하여 설계하였다.

지진시 받침에 발생하는 변위는 상시와 마찬가지로 국부전단변형율 기준에 의해 확인된다.

설계절차

상시

납면진받침의 상시설계는 다음의 네 단계로 이루어진다.

단계 1. 고무패드의 직경 결정

실제 수직하중을 지지하는 것은 고무패드의 면적이 아니라 보강철판의 면적이다. 따라서 상시 설계수직하중(사하중 + 활하중)에 발생하는 응력이 고무의 허용응력인 153 kgf/cm^2 이하가 되도록 보강철판의 면적을 결정한다. 덮개고무로 인하여 고무패드의 직경은 보강철판의 직경보다 3.8cm 더 크다.

단계 2. 납심의 직경 결정

앞서 언급했듯이 상시 풍하중과 차량의 제동하중 원심하중에 대해 상판이 많이 흔들려서는 안된

다. 단, 본 교량은 도로교이며 곡율이 심하지 않은 관계로 차량의 제동하중이나 원심하중보다는 풍하중이 훨씬 지배적이므로, 본 논문에서는 풍하중만을 고려하여 납심의 직경을 결정하였다. 납면진발침의 항복 변위는 대략 1cm 정도이므로 납심의 항복강도가 풍하중 이상이 되도록 납심의 직경을 결정하면, 교량의 사용성이 충분히 확보될 수 있다.

단계 3. 고무층수 결정

현재 KS F 4420의 적층고무발침의 상시 허용변위기준에 따라 교량상판의 교축방향 상시온도변위가 순수고무높이의 70%이하가 되도록 납면진발침의 고무층수를 결정하였다.

단계 4. 국부전단변형율에 대한 검토

AASHTO Guide Specification for Seismic Isolation Design 1991에 의거하여 수직압축하중(활하중+사하중), 교량상판의 온도신축에 따른 전단변형, 수직하중(활하중+사하중)에 의한 발침의 회전, 이 세가지 요소에 의해 발생하는 국부전단변형율이 고무의 파단시 연신율 5를 넘지 않도록 하였다.(단, 안전율 2) 만약, 국부전단변형율 기준을 만족하지 못했을 때는 패드직경을 증가시키거나 고무층수를 늘려야 한다.

표 1 상시 설계수직하중 및 풍하중에 대한 검토

	사하중 (tf)	활하중 (tf)	수직응력 (kgf/cm ²)	허용응력 (kgf/cm ²)	풍하중 (tf)	항복하중 (tf)
면진발침 1	110	81.2	109	153	8.8	9.62
면진발침 2	500	387.3	130	153	30.8	32.12

표 2 상시 온도변위 및 국부전단변형율에 대한 검토

	온도변위 (cm)	허용변위 (cm)	수직처짐 (cm)	총전단변형	파괴연신율 /2
면진발침 1	15.5	15.96	0.28	2.1	2.5
면진발침 2	12	12.6	0.18	2.2	2.5

지진시

납면진발침의 지진시 설계는 다음의 세 단계로 이루어진다.

단계 1 납심 직경의 조절

상시설계조건에 의해 결정된 납심 직경을 최소치로 설정한 후, 목표로 하는 감쇠비와 지진시 억제 하고자 하는 변위에 따라 납심직경을 증가시켰다.

단계 2 고무층수의 조절

상시설계조건에 의해 결정된 고무층수를 최소치로 설정한 후, 목표로 하는 주기(면진 A : 1.5sec)를 만족시키기 위해 고무층수를 증가시켰다.

단계 3. 국부전단변형율에 대한 검토

AASHTO Guide Specification for Seismic Isolation Design 1991 에 의거하여 수직압축하중(사하중), 교량 상판의 지진시 전단변형, 사하중에 의한 받침의 회전, 이 세가지 요소에 의해 발생하는 국부전단 변형율이 고무의 파단시 연신율 5 를 넘지 않도록 하였다.(단, 안전율 1.33)

표 3 지진시 변위 및 국부전단변형율에 대한 검토

	지진변위 (cm)	허용변위 (cm)	수직처짐 (cm)	총전단변형	파괴연신율 / 1.33
면진받침 1	4.0	34.2	0.16	2.3	3.8
면진받침 2	4.37	27.0	0.10	2.0	3.8

설계결과

앞서 언급한 상시 및 지진시 설계기준을 만족하도록 표 와 같이 두 종류(교대부와 교각부)의 납면진받침이 설계되었다..

표 4 납면진받침의 제원

	평면크기 (cm)	납직경 (cm)	고무층 (cm)	무게 (kgf)
면진받침 1	62.2	12	24	833
면진받침 2	105.4	22	19	1663

표는 설계된 납면진받침의 비선형 특성을 나타내고 있다

표 5 납면진받침의 비선형 이력특성

	탄성강성 (tf/cm)	항복강도 (tf)	특성강도 (tf)	항복강성 (tf/cm)	수직강성 (tf/cm)
면진받침 1	8.75	9.62	8.63	0.9	687
면진받침 2	32.60	32.12	28.93	3.24	4975

5. 해석결과

면진위치가 다른 각 모델의 거동특성을 알아보기위하여 변위, 가속도, 전단력, 휨모멘트, 납면진받침의 흡수능력에 대하여 조사하였다. 표 6 은 절대최대값을 표시하고 있으며 교각 3 의 응답결과를 표시하고 있다. 교각의 강성에 기인하여 첫번째 고유주기는 각 모델에 대하여 변하고 있지만 각 납면진받침의 설계값은 큰 차이가 없는 것으로부터 1) 면진 A 모델의 면진장치 설계값을 기준으로 면진받침을 설계하였다.

표 6 내진 및 면진교량의 응답 (교각 3)

구분	비면진	면진 A	면진 B	면진 C	면진 D	위치
변위 (cm)	4.18	6.13	5.46	7.42	7.40	상판

	2.05	9.40	4.71	5.84	5.82	교각
가속도 (cm/s ²)	3.12	240	211	231	231	상판
	1.78	137	210	167	165	교각
진단력 (tf)	529.4	91.2	108.8	88.69	72.5	교각상하부
휨모멘트 (tfm)	6533	2376	1171	35.1	34.6	교각상하부
주기 (sec)	0.81	1.65	1.80	2.18	2.17	

변위와 구조변형

변위는 교량의 상부구조와 면진장치상부에서의 상대변위를 조사하였다. 그림 2 는 상부구조의 변위를 그림 3 는 면진장치의 변위를 나타내고 있다. O 는 비면진교량을 A, B, C, D 는 각 면진교량의 모델을 나타내고 있다. 비면진교량의 모델을 기준으로 보면 각 면진교량의 모델들은 상대적으로 변위가 커짐을 알 수 있다. 면진장치의 상대변위는 면진교량 B 가 가장 큰 것을 알 수 있는데 이것은 이 모델의 면진장치가 외부 에너지를 많이 흡수 할 수 있음을 알 수 있다.

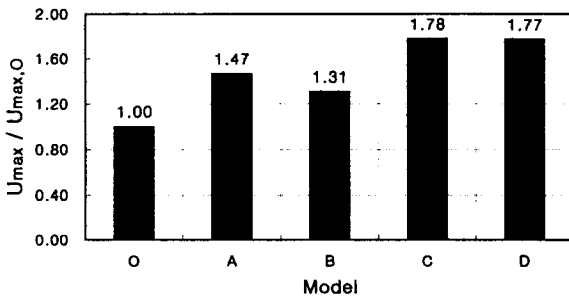


그림 2 상부구조변위

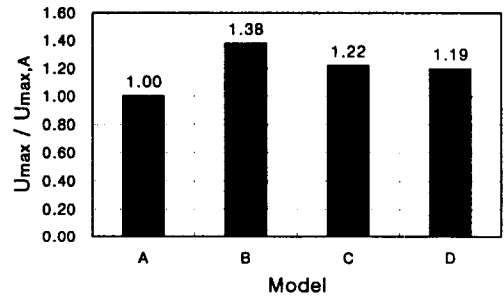


그림 3 면진장치변위

가속도

그림 4 와 5 는 상부구조에서의 가속도와 교각에서의 가속도를 나타내고 있으며 면진교량의 상부에서의 가속도는 비면진교량의 가속도보다 저감된 값을 보여주고 있으나 교각에서의 가속도는 면진교량 모델 B 가 비면진교량보다 약간 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있으나 이것은 면진장치 상하부의 가속도의 상대속도에 의한 증가라고 생각되어 진다.

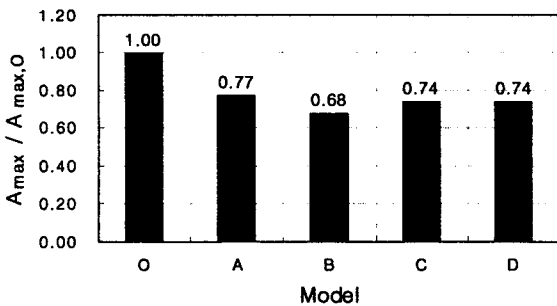


그림 4 상부구조 가속도

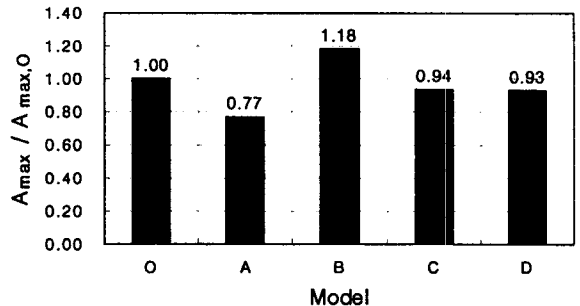


그림 5 교각 가속도

전단력과 휨모멘트

그림 6 은 교각하부의 전단력을 나타내고 있으며 다른 응답들과 비교해 보았을 때 응답저감효과는 크다고 볼 수 있으며 면진교량은 전단력에 유리함을 알 수 있다. 그림 7은 교각하부의 휨모멘트를 나타내고 있으며 비면진교량보다 현저히 저감된 응답을 보여 주고 있다.

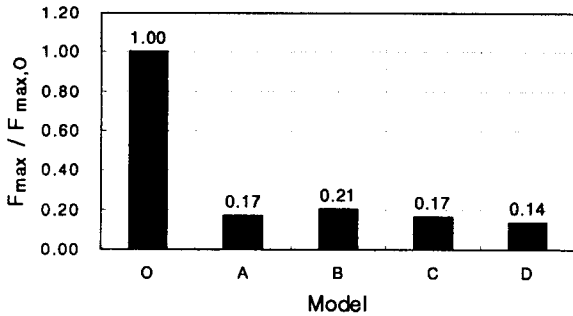


그림 6 교각하부 전단력 (C, D: 교각상부)

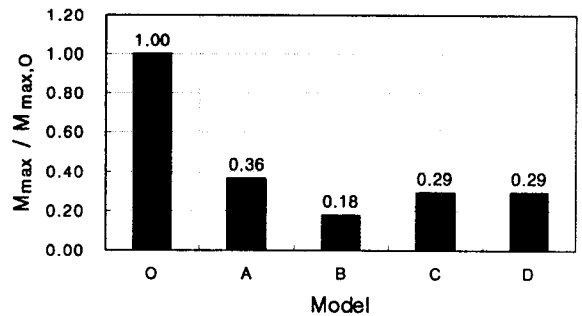


그림 7 교각하부 모멘트 (C, D: 교각상부)

흡수에너지

그림 8에서 보면 각 면진장치의 흡수능력은 면진교량 B가 가장 크다는 것을 알 수 있고 표 7에서 보는 바와 같이 에너지 흡수량에 영향을 미치는 최대변위도 가장 크다는 것을 알 수 있다.

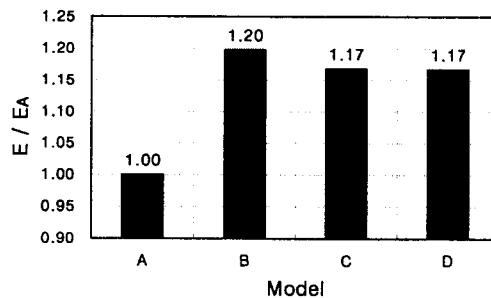


그림 8 흡수에너지

표 7 면진장치의 누적흡수 에너지 와 최대 변위

	면진 A	면진 B	면진 C	면진 D
$E_p(\text{tf cm})$	127.8	153	149.2	149.1
$u_{max,l}$	4.18	4.38	3.87	3.80

6. 결론

선정된 교량에 대해 면진위치가 다른 4 가지의 면진교량모델에 대하여 비선형동적해석을 실시하

였고 그 응답치는 면진위치에 따라 다르게 나타나고 있으며 면진효과도 상이하게 나타남을 알 수 있다. 외부에너지 흡수면에서는 교각의 중간에 면진화 한 것이 효과적이었으나 설치상 문제점과 구조물에 안전성으로 문제가 될 것이다. 대체로 본 해석에 선정된 비교적 교각이 높은 교량은 교량하부에 면진장치를 설치 전 교량을 면진화 하는 것이 효과적이라고 판단된다.

참고문헌

1. Jeung-geun Park, and Otsuka Hisanori, "Dynamic Characteristics of Isolated Bridges Considering Different Location of Seismic Isolation", JSCE Journal of Structural Engineering, Vol. 44A, March 1998, pp. 743-751