

전단키가 있는 다경간 연속교의 지진응답특성

SEISMIC RESPONSE CHARACTERISTICS OF THE MULTI-SPAN CONTINUOUS BRIDGE WITH SHEAR KEYS

이지훈*
Lee, ji-hoon

전귀현**
Juhn, gui-hyun

ABSTRACT

This paper deals with the dynamic responses of the multi-span continuous bridge with longitudinal shear keys. It is motivated by a need to understand the effects of longitudinal shear keys which may be used for the reduction of the longitudinal seismic force in continuous bridges.

The results show that (1) The force reduction of fixed pier is proportional to the ratio of gap size and elastic maximum displacement of the bridges without shear keys ; (2) The thermal movement has little effect on the response of the continuous bridges with shear keys. Also the simplified equation is proposed to calculate the maximum response of the continuous bridges with longitudinal shear keys. The equation requires only the elastic analysis results of the bridge and the gap size between superstructure and shear keys.

1. 서론

국내의 연속교는 대부분 일점고정 다경간 연속교로서 받침장치의 구성은 교축방향으로 하나의 고정지점과 마찰계수가 작은 가동받침들로 되어있다. 이와 같은 일점고정 연속교는 교축방향 지반 운동하에서 고정단 하부구조에 대부분의 상부구조 관성력이 집중되게 된다. 따라서 일점고정 연속교 고정단 교각에는 중·소 규모의 지진하에서도 교축방향으로 상당히 큰 지진력이 작용하게 된다. 고정단 교각의 지진력을 감소시키기 위하여 1) 내진분리 베어링^(1,2,3) 2) 교축방향 수평력의 분산을 위한 장치⁽³⁾ 3) 교축방향의 전단키등을 사용하는 방안들이 제시되어 왔다. 이들 방안중 내진분리 베어링은 교량 고유주기를 이동시켜 지진력 감소효과를 도모하나 교축방향의 큰 수평변위가 수반된다. 교축방향의 수평력 분산을 위한 장치는 기계적인 기능확보를 위한 유지관리가 요구된다. 이와 같은 방법들에 비하여 교축방향 전단키는 고정단 교각의 변위를 제어하여 수평력을 감소시키는 역할을 하는 것으로 배관 시스템에서 널리 이용되고 있는 방법이다.^(4,5) 본 연구에서는 일점고정 다경간 연속교에 있어서 종방향 전단키의 교축방향 지진력 감소효과를 비선형 동적해석을 통하여 고찰하였다. 또한 전단키가 설치된 일점고정 연속교의 최대응답을 계산할수 있는 간편한 방법을 제시하였다.

* 시설안전기술공단 교량본부 사원, 정회원

** 시설안전기술공단 교량본부 부장, 공학박사, 구조기술사, 정회원

2. 대상교량

본 연구의 대상교량은 경간장이 40+50@4+40=280m인 6경간 P.S.C Box Girder 연속교로서 그림 1과 같으며 상, 하부구조의 특성은 도표 1과 같다. 총 7개 교각중 P₄는 고정단 교각이고 인접교각인 P₃, P₅에 그림 1(b)와 같은 전단키가 설치되어 있다.

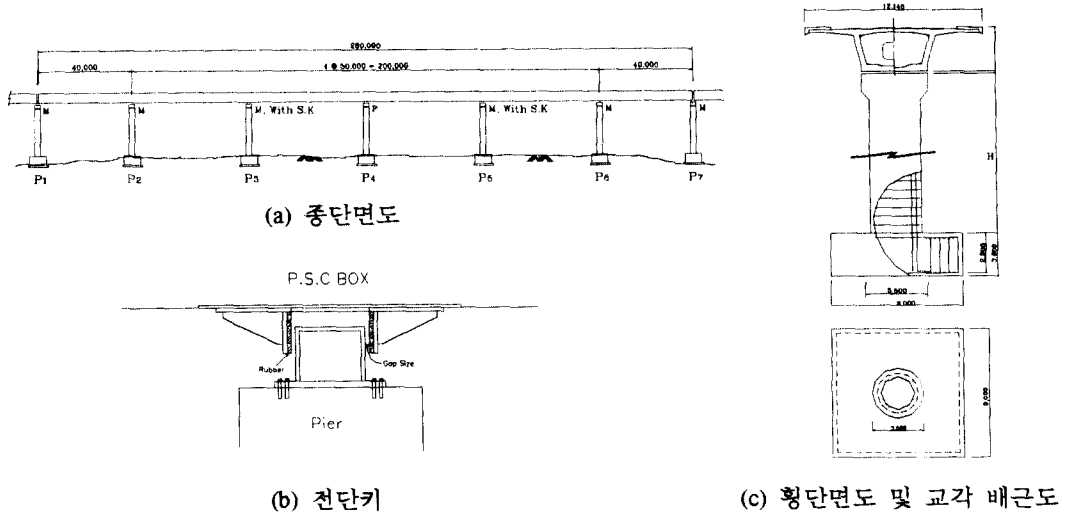


그림 1. 대상교량

도표 1. 상부구조 및 하부구조 특성

상 부 구 조	차 선 수	2차선 (교폭 12.145m)	
	단 위 m당 중 량 (w(x))	21.5 t/m	
	단 면 적 (A)	8.6 m ²	
	단면강성(EI _s)	3.50×10 ⁷ t/m ²	
하 부 구 조	교 각	형 식	T형 원형교각
		코 핑 중 량	108 ton
		지 름	3.5 m
		단 면 적 (A)	8.61 m ²
		단 면 강 성 (E · I _{eff})	5.26×10 ⁶ t/m ²
		항복 응력(σ _y) (σ _{ck})	3000 (SD30) kg/cm ² 240 kg/cm ²
		사 용 주철근	D29×104
		사 용 피철근	D13, S=300 mm
		주 철근 비	0.7 %
		콘크리트 덮개	100 mm
기 초	기 초	형 식	직접기초
		지반반력계수 (K _v)	587,250 t/m
		(K _h)	187,250 t/m
		(K _r)	396,393 t/m

3 비선형 동적해석

기둥단 교각에 전단키가 설치되어 있는 경우 대상교량의 응답특성을 규명하기 위하여 비선형 동적해석을 수행하였다.

3.1 해석모델

교축방향의 지진을 고려하여 3자유도(U_x, U_z, R_y)를 가지는 2차원 평면골조 모델링을 하였으며, 해석프로그램은 범용 구조해석 프로그램인 SAP2000 Nonlinear를 사용 하였다. (그림 2)

모델 교량을 해석하기 위해 상부구조(주형) 및 하부구조(교각)은 빔요소로 모델링 하였으며, 받침부에 비선형 성질을 가진 Gap과 Hook요소를 사용하여 전단키를 모델링하였다. 전단키모델링은 이격거리(Gap Size)까지는 자유단으로 거동하며, 이격거리 이후 즉 상부구조와 전단키가 접촉된 이후에는 그림 3의 모델상 스프링 강성(K)에 의해 저항된다.

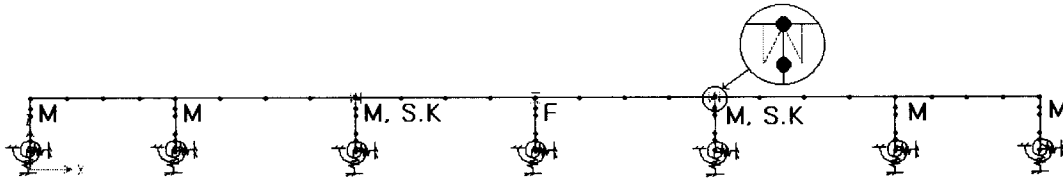
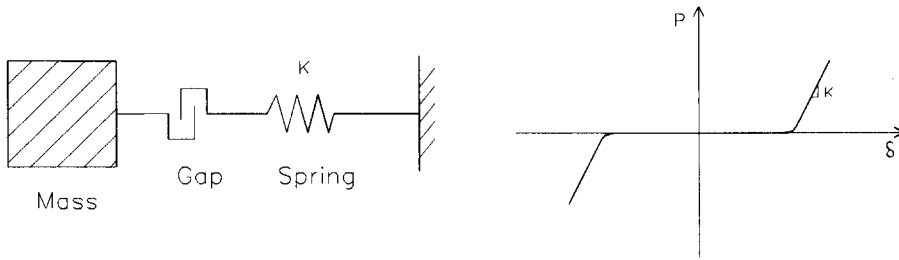


그림 2. 대상교량의 모델링



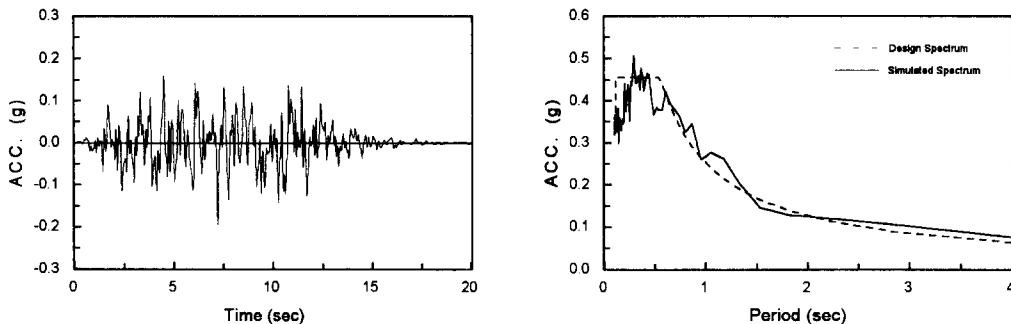
(a) 수학적 모델

(b) 하중-변위 관계곡선

그림 3. Gap의 수학적 모델 및 거동특성

3.2 입력지진하중

비선형 동적해석을 위한 입력지진하중은 그림 4(b)의 설계 응답스펙트럼에 상응하는 그림 4(a)의 지반가속도를 사용하였다.



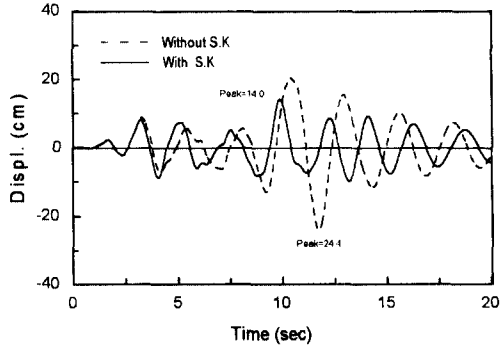
(a) 인공시간이력 지진파

(b) 설계 응답스펙트럼

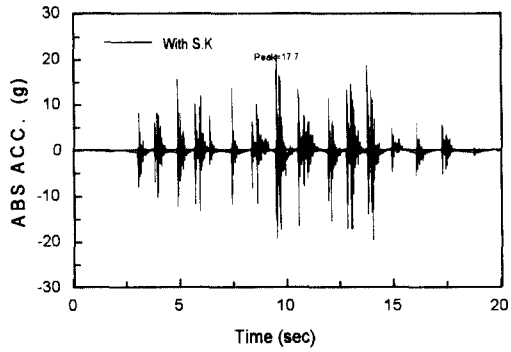
그림 4. 입력지진하중

3.3 응답특성

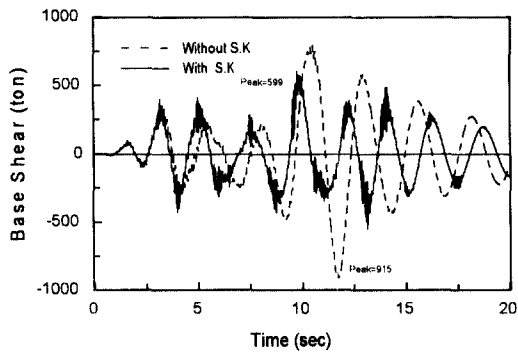
대상교량의 전단키 설치유무에 따른 시간이력 해석결과 대표적인 응답시간이력은 그림 5와 같다. 대상교량의 교각높이는 15m로서 1차 고유주기는 2.56초이고 전단키의 이격거리는 5cm인 경우이다.



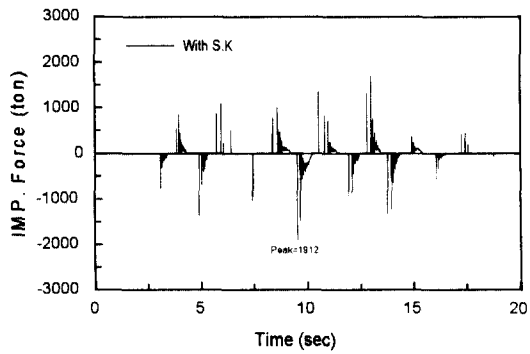
(a) 상부구조의 변위



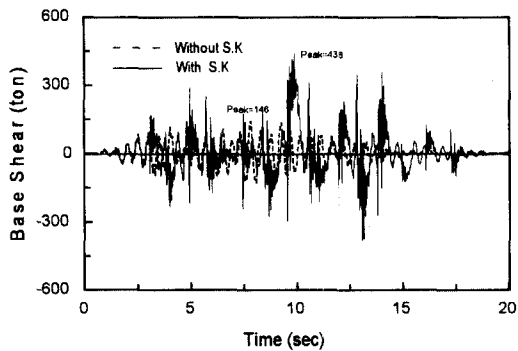
(d) 상부구조 가속도



(b) 고정단 교각 밀면전단력



(e) 전단키 충격력



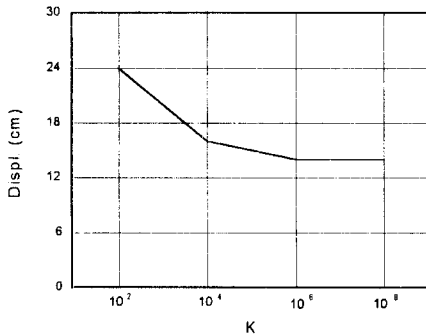
(c) 가동단 교각 밀면전단력

그림 5. 응답시간이력

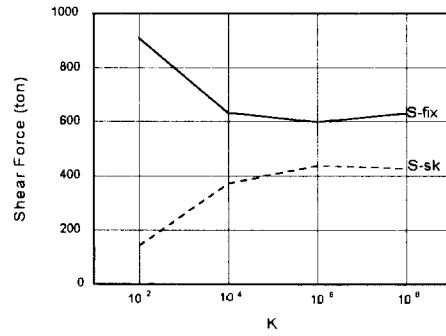
그림 5(a), (b)에서 보듯이 상부구조의 최대변위가 24.4cm에서 14.0cm로 감소하였으며 이에 따라 고정단 교각의 전단력이 915ton에서 599ton으로 감소된다. 그러나 전단키를 설치한 가동단 교각의 전단력은 146ton에서 438ton으로 증가된다. (그림 5(c)) 이는 전단키의 충격으로 인하여 가동단 교각에 작용하는 수평력이 증가하기 때문이다.

그림 5(b)의 고정단 교각에 발생하는 전단력을 살펴보면 고정단과 상부구조가 형성하고 있는 진동단위의 1차 고유주기에 해당하는 응답이 지배적이고 충격에 의한 고주파수의 응답성분은 상대적으로 작음을 알 수 있다. 또한 그림 5(c)의 가동단 교각에 발생하는 전단력은 고주파수의 응답이 지배적임을 알 수 있다. 이러한 응답특성은 고정단 교각이 이루고 있는 진동단위와 가동단 교각의 진동단위의 고유주기 차이에 의한 것으로서 고유주기가 작은 가동단 교각이 고주파수 성분의 충격력에 의한 영향이 크기 때문이다.

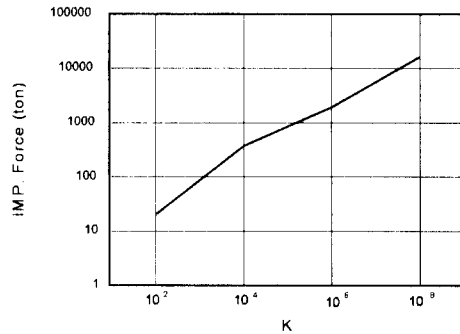
그림 5(d)와 (e)의 상부구조 가속도와 전단키의 충격력의 크기는 해석모델상 Gap요소의 강성(K)에 따라 크게 좌우되며 이에대한 특성을 고찰하기 위하여 K값에 따른 계산을 수행하였으며 그 결과는 그림 6과 같다.



(a) 상부구조의 변위



(b) 교각 밀면전단력



(c) 전단키 충격력

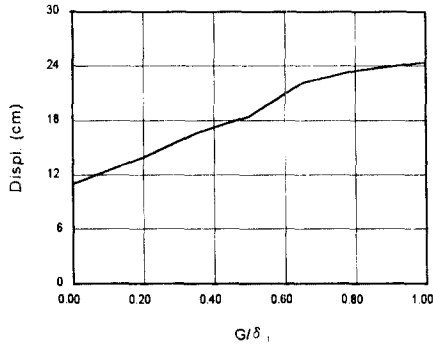
그림 6. Gap요소의 강성에 따른 응답특성

그림 6(a), (b)에서 알수 있듯이 상부구조의 변위와 교각전단력은 K가 10^6 이상인 경우 거의 변화가 없다. 반면에 상부구조와 전단키 사이의 충격력의 최대크기는 그림 3의 해석모델상 스프링 강성(K)에 따라 그림 6(c)와 같은 변화를 보인다. 이는 Gap요소의 강성(K)이 클수록 충격시간 (Impact Duration)이 짧아지기 때문이다. 따라서 임의의 강성값을 사용하여 구한 충격력은 실제 전단키에 작용하는 충격력과는 큰 차이가 있다.

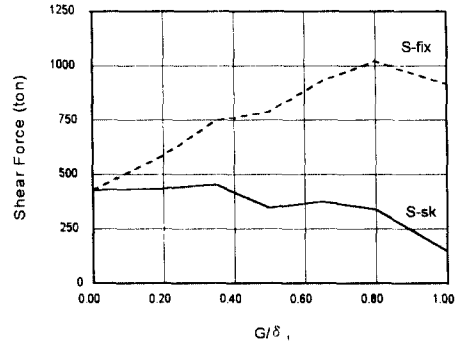
전단키에 작용하는 충격력은 상부구조와 전단키의 충돌시 발생하는 에너지 감쇠, 변형등에 따라 다르며 그 값을 해석상 계산하기는 매우어렵다.⁽⁶⁾ 따라서 전단키를 설계함에 있어 계산 충격력을 사용하기 보다는 충격력을 완화하기 위하여 고무등의 완충재를 사용하고 있다.

3.4 이격거리에 따른 최대응답

전단키의 이격거리에 따른 최대응답을 비교하기 위해 고유주기가 2.56초인 교량을 대상으로 이격거리비에 따른 상부구조의 변위와 고정단, 가동단교각의 전단력을 계산한 결과는 그림 7과 같다. 여기서 이격거리비(G/δ_i)는 전단키의 설치유간과 일점고정인 경우 최대 탄성변위와의 비로 이격거리비가 0인 경우 3점고정에 해당되며 이격거리비가 1인 경우 일점고정 연속교에 해당된다.



(a) 변위



(b) 밑면 전단력

그림 7. 이격거리비에 따른 응답

전단키를 설치한 경우 이격거리가 작을수록 상부구조의 변위 및 고정단 교각의 전단력은 감소하며 그 한계값은 3점고정의 경우다. 그러나, 이격거리가 일점고정 탄성변위의 80%인 경우 변위는 일점고정인 경우보다 작으나(그림 7(a)) 고정단 고정단 교각의 전단력은 일점고정인 경우보다 약간크다.(그림 7(b)) 이러한 고정단교각의 전단력증가는 충격력에 의한것으로서 상대적으로 작다. 가동단 교각의 경우 이격거리비의 감소에 따라 전단력이 증가 되며 그 최대값은 3점고정의 경우가 된다.

전단키상의 온도변화에 따른 이격거리 차이가 있는 경우 최대응답의 변화를 비교하기 위해 0℃, 10℃, 20℃, 40℃에 따른 해석을 수행하였다. 도표 2는 전단키 이격거리가 5cm인 교량에 온도 변화로 인해 고정단 교각을 중심으로 좌우측 가동단 교각(P₃, P₅)의 이격거리가 변할 때의 최대응답 결과이다.

도표 2. 온도변화에 의한 이격거리 변화시 응답

경우	상부구조 변 위	교각의 밑면전단력 (Base Shear)
	d _i (cm)	P ₄ (ton, 고정단)
CASE 1 (ΔT=0℃)	14.0	599
CASE 2 (ΔT=10℃)	14.2	600
CASE 3 (ΔT=20℃)	14.2	587
CASE 4 (ΔT=40℃)	12.7	561

도표 2로부터 온도변화에 따른 이격거리 차이로 인한 상부구조의 변위 및 고정단 교각의 전단력 변화는 10% 이내로 매우 적음을 알 수 있다.

4. 전단키를 고려할 수 있는 간편식

그림 1과 같은 전단키가 있는 일점고정 연속교의 경우 전단키가 설치되어 있는 가동단 교각은 상부구조 전체와 고정단 교각이 이루고 있는 진동단위의 스톱퍼 역할을 하는 것으로 볼 수 있다.

그림 8에 각각의 진동단위를 단자유도 시스템으로 고려한 수학적 모델을 도시하였다.

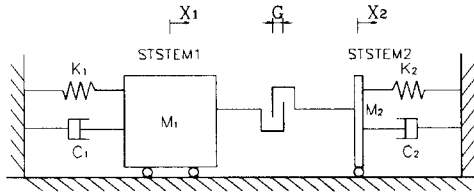


그림 8. 전단키가 있는 경우 수학적 모델

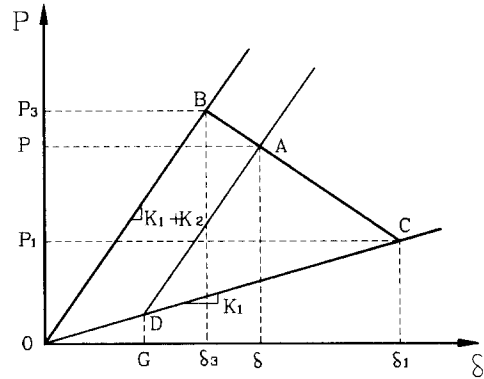


그림 9. 하중-변위 관계곡선

그림 8에서 시스템1은 상부구조 전체와 고정단 교각이 이루고 있는 진동단위이고 시스템2는 전단키가 설치되어 있는 가동단 교각이다. 그림 8과 같은 진동 시스템하에서 시스템1의 변위는 시스템2의 존재에 의해 제어된다. 이와같은 변위제어 거동을 도식적으로 표현하면 그림 9와 같다. 그림 9의 하중-변위 관계곡선에서 P_1, δ_1 은 $G \geq \delta_1$ 인 경우 시스템1의 힘과 변위이고 P_3, δ_3 는 $G=0$ 인 경우 즉 두 시스템이 밀착된 경우의 응답이다. 따라서 전단키의 이격거리가 G 인 경우 시스템1의 변위가 G 까지는 강성 K_1 에 따라 거동하고(O-D) G 를 초과하는 경우 두시스템이 일체로 거동하며(D-A) 이때 강성은 K_1+K_2 가 된다. 따라서 가동단에 전단키가 있는 경우 전단키 이격거리 G 가 주어지면 변위 δ 는 그림 9상의 A점으로 생각할 수 있다. 이격거리에 따른 응답특성은 $G \geq \delta_1$ 인 경우 C점에 해당되는 시스템1만의 최대응답과 동일하고 $G=0$ 인 경우 B점에 해당되는 시스템1과 2이 일체 거동시의 최대응답과 동일하다. 따라서 그림 8과 같은 시스템의 최대응답은 탄성변위 δ_1, δ_3 와 이격거리 G 만 주어지면 다음 비례식으로 구할 수 있다.

$$\delta = \delta_3 + (\delta_1 - \delta_3) \cdot \frac{G}{\delta_1} \quad (1)$$

고유주기가 1초, 2.56초, 3.77초인 일점고정 다경간 연속교에 대하여 식 (1)을 이용하여 구한 최대변위와 비선형 동적해석에 의한 최대변위를 이격거리비별로 계산하여 비교한 결과는 도표 3과 같다.

도표 3. 전단키설치에 따른 상부구조 변위

고유주기 이격거리비 (G/δ_1)	T=1초			T=2.56초			T=3.77초		
	동적해석 (cm)	식(1) (cm)	해석-식(1) 해석 (%)	동적해석 (cm)	식(1) (cm)	해석-식(1) 해석 (%)	동적해석 (cm)	식(1) (cm)	해석-식(1) 해석 (%)
0.00	4.2	4.2	0	11.0	11.0	0	20.1	20.1	0
0.20	4.7	4.8	2	13.9	13.7	2	20.7	22.4	8
0.35	5.2	5.2	0	16.6	15.7	5	24.4	24.2	1
0.50	5.6	5.7	1	18.4	17.7	4	28.6	26.0	9
0.65	6.4	6.1	5	22.1	19.7	11	29.2	27.7	5
0.80	6.9	6.5	6	23.4	21.7	7	30.7	29.5	4
1.00	7.1	7.1	0	24.4	24.4	0	31.8	31.8	0

식 (1)에 따른 최대변위 결과는 비선형 동적해석에 의한 결과의 10%내외의 오차범위내에 있음을 도표 3에서 알 수 있다. 따라서 식 (1)은 전단키가 있는 경우 비선형 동적해석 대신 유용하게 사용할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 전단키가 설치된 일점고정 다경간 연속교의 지진응답 특성을 비탄성 동적해석을 통하여 고찰 하였으며, 상부구조의 변위를 산정하는 간편한 방법을 제시하였다.

- (1) 전단키 해석모델의 스프링강성(K)이 증가함에 따라 충격력은 증가하므로 임의의 강성값을 사용하여 구한 충격력은 실제 전단키에 작용하는 충격력과는 큰 차이가 있다.
- (2) 일점고정 연속교에 있어서 교축방향 전단키가 설치된 교량의 최대응답은 전단키의 이격거리와 일점고정인 경우 최대탄성변위의 비에 따라 거의 직선적으로 비례한다.
- (3) 온도변화에 따른 이격거리의 변화가 최대응답에 미치는 영향은 작다.
- (4) 전단키는 상부구조 변위를 제어하는 효과가 있어 예기치 않은 고정단의 받침 또는 교각파손이 발생할 경우 과대변위에 의한 교량의 붕괴를 방지할 수 있다. 따라서 향후 고정단교각의 비탄성거동을 고려한 다경간 연속교의 응답특성을 규명하고자 한다.

참고문헌

1. "Guide Specifications for Seismic Requirements for Highway Bridges", 1991, AASHOTO.
2. "Proceedings from the First U.S.-Japan Workshop on Earthquake Protective Systems for Bridges", NCEER.
3. M. J. N. Priestley., F. Seible, G. M. Calvi (1996),"Seismic Design and Retrofit of Bridges" JOHN WILLY & SONS, INC.
4. A. Sone, H.Suzuki, "A Practical Method for Obtaining Nonlinear Response Properties Considering the Effect of Gap and Friction Among Piping and Supports".
5. H. Lue, S. Hanagud, "On the Dynamics of Vibration Absorbers with Motion-Limiting Stops" Journal of Applied Mechanics", ASME, Vol. 65, p223-233.
6. Praveen K. Malhotra, "Dynamics of Seismic Pounding at Expansion Joints of Concrete Bridges", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 124, No.7, p794-802.