

다경간연속교의 교축방향 이동제한장치의 설계방법

Design Methods of the Longitudinal Motion-Limiting Devices in Multi-Span Continuous Bridges

전 귀 현* 이 지 훈**
Juhn, Gui Hyun Lee, Ji Hoon

국문요약

이동제한장치는 내진분리된 교량 또는 교각에 소성힌지가 발생하는 다경간연속교에 있어서 지진에 의한 교축방향 최대변위 및 잔류변위를 제한함에 있어 매우 효과적이다. 교축방향의 수평변위가 이동제한장치에 의해 제한되는 경우 상부구조의 최대변위를 예측하기 위해서 비선형동적해석을 설계에 실무적으로 사용하기에는 시간소요 및 해석상 어려움이 있다. 본 연구에서는 등가탄성해석 방법과 가속도-변위 스펙트럼을 이용한 간단한 이동제한장치 설계절차를 제시하였다. 여기서 제시된 방법은 이동제한장치의 설치위치 및 이격거리를 결정함에 있어 매우 효율적으로 사용할 수 있을 것이다.

주요어 : 이동제한장치, 내진분리베어링, 등가탄성해석방법, 가속도-변위스펙트럼, 이격거리

ABSTRACT

The motion-limiting devices can be used for reducing the maximum and residual displacements of the multi-span continuous bridges with inelastic elements such as isolation bearings and plastic hinges formed in piers. For the design of motion-limiting device, the nonlinear time history analysis is required. But the time history analysis is time consuming and very complex. This study suggests the simple design procedure of the motion-limiting devices using the equivalent elastic analysis method and the acceleration-displacement spectrum concept. The suggested design procedure can be used very effectively for determining the location and gap size of the motion-limiting devices.

Key words : motion-limiting devices, isolation bearing, equivalent elastic analysis method, acceleration-displacement spectrum, gap size

1. 서 론

국내 대부분의 연속교는 일점고정 다경간으로서 받침장치의 구성은 교축방향으로 하나의 고정지점과 마찰계수가 작은 가동받침들로 되어있다. 이는 온도변화, 건조수축, creep 등에 의한 상부구조의 교축방향으로 신축을 원활히 할 수 있도록 배려한 것이나 교축방향의 지반 운동하에서는 고정단교각에 상부구조의 관성력이 집중되어 고정받침 및 하부구조의 파손

우려가 매우높다.

연속교의 고정단교각이 낮은 경우는 전단파괴의 우려가 높고, 높이가 높은경우 교각하부에 소성힌지 발생으로 인한 휨파괴가 예상된다. 이러한 교각의 파괴에 대한 대비책으로는 내진분리베어링의 사용으로 작용수평력을 단면강도이하로 제한하거나⁽¹⁾ 휨파괴에 대해서는 교각의 항복후 변형성능을 향상시키는 방안이 있다.⁽²⁾ 이와같이 내진분리베어링의 사용 및 교각의 변형성능향상에 입각한 연속교의 경우 국부적인 비탄성거동으로 인한 최대변위 및 지진후 영구잔류변위를 제한할 필요가 있다.⁽³⁾ 이러한 교축방향의 수평변위는 중간교각의

* 정회원 · 시설안전기술공단 진단1본부 실장, 공학박사, 구조기술사

** 정회원 · 시설안전기술공단 진단1본부 사원

이동제한장치 또는 교대에 의하여 제한되는 바^{(4)~(6)} 상부구조의 최대변위를 예측하기 위해서는 이동제한장치의 이격거리를 고려한 비선형동적해석을 수행하여야 한다. 그러나 비선형동적해석을 실무적으로 사용하기에는 해석모델수립, 입력지진하중, 결과분석등에 어려움이 있어 매우 세심한 주의를 요하고 많은 시간이 소요된다.

본 연구에서는 교각 또는 내진분리베어링의 항복에 따른 국부적인 비탄성거동과 이동제한 특성을 고려한 교량의 종방향 최대변위를 예측할 수 있는 근사적인 방법인 등가탄성해석방법과 가속도-변위응답스펙트럼을 이용한 이동제한장치의 설계방법을 제시하였다.

2. 등가탄성해석방법

교각 및 내진분리베어링의 항복특성과 이동제한장치 또는 교대와 상부구조사이의 이격거리(Gap)를 수학적 모델로 도시하면 그림 1과 같다.

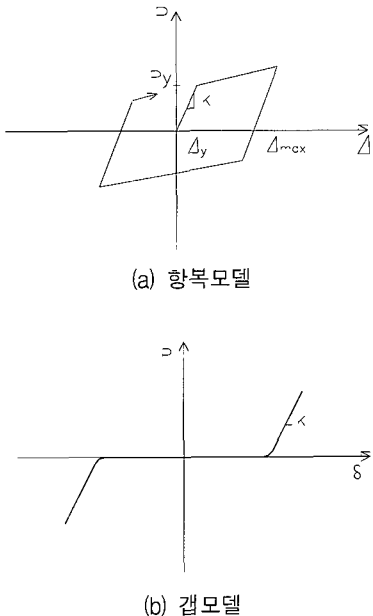


그림 1 비탄성요소

그림 1의 비탄성요소를 지닌 간단한 해석모델은 그림 2와 같다.

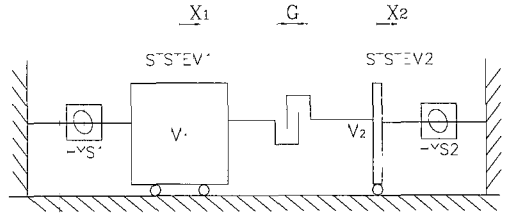


그림 2 간단한 2-DOF 모델

그림 2의 시스템 1은 상부구조와 고정단교각이 이루고 있는 설계진동단위, 시스템 2는 이동제한장치가 설치되어 있는 교각 또는 교대의 진동단위로 생각할 수 있다.

그림 2상에서 HYS1, HYS2는 각 진동단위의 비탄성요소로서 그림 1(a)의 거동특성을 나타내고 G는 그림 1(b)의 이동제한 거동을 나타낸다.

그림 2의 간단한 2자유도 시스템을 1자유도 시스템으로 고려하여 하중과 변위관계 곡선을 도시하면 그림 3과 같다.

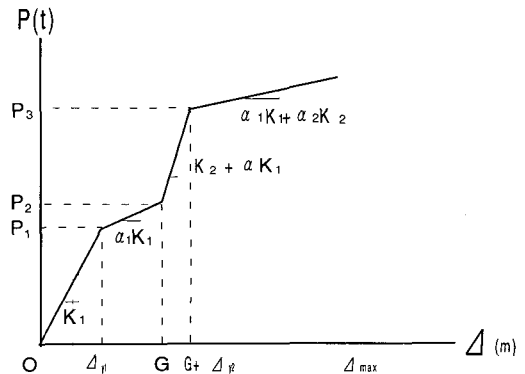


그림 3 하중-변위 관계곡선

그림 3의 하중-변위관계곡선을 이용하여 그림 2의 2자유도 시스템의 등가탄성해석 절차를 요약하면 그림 4와 같다.

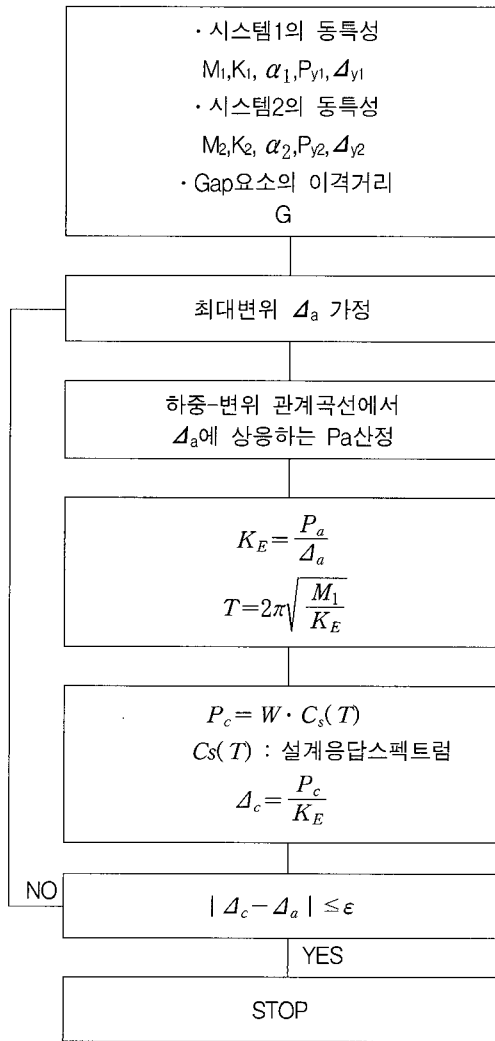
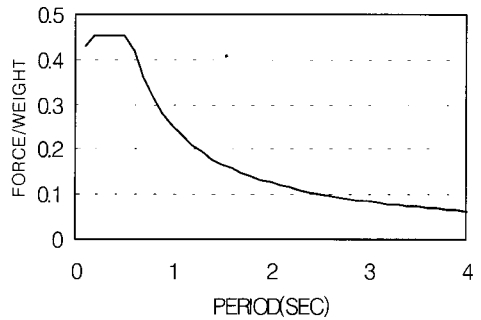


그림 4 등가탄성해석절차

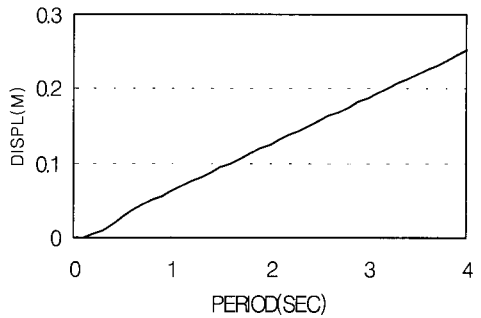
이상의 등가탄성 해석방법은 비탄성거동에 따른 에너지 감쇠효과를 고려하지 않고 있으므로 전체 시스템이 항복거동을 하는 경우 즉 Δ_{max} 가 $G + \Delta_{y2}$ 보다 큰 경우에는 오차가 크게 발생함을 주의하여야 한다. 따라서 전체 시스템이 탄-소성거동을 하는 경우에 최대변위 계산은 비선형동적해석을 수행함이 바람직하다. 그러나 비선형동적해석을 수행하는 경우에도 입력지반운동의 특성과 구조물의 동특성에 따라 최대발생 변위는 크게 차이가 있음을 고려하여야 한다.

3. 가속도-변위응답스펙트럼

일반적으로 설계응답스펙트럼은 그림 5(a)와 같이 가속도와 주기로 도시되는 가속도응답스펙트럼과 그림 5(b)와 같이 변위와 주기로 도시되는 변위응답스펙트럼으로 표시한다. 반면



(a) 가속도 응답스펙트럼



(b) 변위 응답스펙트럼

그림 5 설계응답스펙트럼

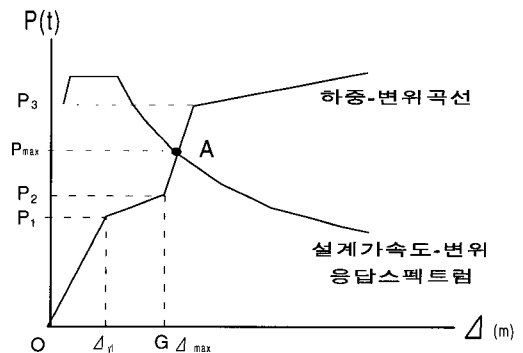


그림 6 하중-변위곡선과 가속도-변위스펙트럼

에 가속도-변위응답스펙트럼⁽⁷⁾은 가속도와 변위를 함께 도시함으로써 그림 3의 하중-변위곡선과 설계스펙트럼을 동시에 나타낼 수 있는 장점이 있다. 그림 6은 전체시스템의 하중-변위관계곡선과 가속도-변위응답스펙트럼을 함께 도시한 개념도이다.

그림 6상에서 시스템의 하중-변위곡선과 가속도-변위응답스펙트럼이 교차하는 점A가 설계지진하의 최대변위(Δ_{max}) 및 그에 따른 발생하중(P_{max})이 된다. 2장의 등가탄성해석방법은 시스템의 하중-변위곡선(그림 3)과 가속도응답스펙트럼(그림 5(a))을 사용하여 점A를 구하는 과정이다. 반면에 가속도-변위응답스펙트럼을 사용하는 절차를 요약하면 그림 7과 같다.

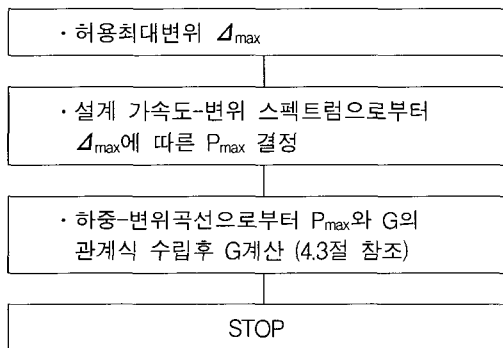


그림 7 가속도-변위스펙트럼을 사용한 설계절차

그림 7에 따른 절차는 최대변위 Δ_{max} 가 주어지는 경우 2장의 등가탄성해석방법과는 달리 반복계산이 필요없이 이동제한장치의 이격거리 G를 계산할 수 있다.

이상의 절차에서 시스템의 비탄성거동에 따른

에너지 감쇠효과는 등가감쇠계수(Equivalent viscous damping) 개념을 도입하여 그에 따라 가속도-변위스펙트럼을 수정하여 고려할 수 있다. 그러나 복잡한 시스템의 비탄성거동의 에너지 감쇠효과에 따른 등가감쇠계수를 구하는 것은 어려우므로 등가탄성해석방법의 경우와 같이 전체시스템이 비탄성거동을 하는 경우 즉 그림 6에서 P_{max} 가 P_3 보다 큰 경우에는 비선형동적해석을 수행함이 바람직하다.

4. 실교량 적용예

4.1 대상교량

여기에서 제시된 설계방법을 실교량에 적용하기 위하여 선정된 교량은 그림 8과 같다.

대상교량은 경간장이 $40+4@50+40=280m$ 인 6경간 P.S.C Box Girder연속교로서 구조특성은 표 1과 같다. 교각들 중 P_4 는 고정단교각이고 나머지는 가동단교각들이다.

표 1 연속교의 구조특성

상부구조	차 선 수	2차선 (교폭 12.145m)
	단 위 m당 중 량 $w(x)$	21.5 t/m
교 각	형 식	T형 원형교각 (Solid)
	교 각 지 름	3.5 m
	주 철 근 비	1%
	띠철근 체적비	0.2%
	유효 단면강성 $(E \cdot I_{eff})$	$6.4 \times 10^6 t \cdot m^2$

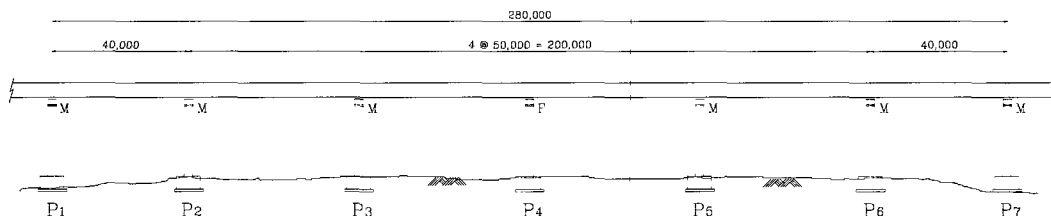


그림 8 대상교량

표 2 교각높이에 따른 강도 및 탄성지진력

교각높이 (m)	전단강도 (t)	휨강도 (t)	항복변위(cm)	고유주기 (초)	교축방향 탄성지진력(t)
5	1050	1152	0.76	0.40	2739
7	970	827	1.5	0.66	2377
10	910	579	3.0	1.12	1352
16	857	361	7.7	2.27	668
20	840	290	12.0	3.17	478

대상교각의 높이에 따른 강도와 교축방향 탄성지진력은 표 2와 같다.

지진에 의한 교각의 파괴모드는 단면강도와 교각의 높이에 따라 결정된다. 본 대상교량의 경우 교각높이가 6m이하인 경우 전단파괴가 발생하고 그 이상인 경우 철근상세에 따라 휨 파괴 또는 휨-전단파괴, 주철근 부착파괴중 하나의 파괴모드가 발생한다.⁽²⁾ 따라서 이와같은 파괴를 방지하기 위한 대책으로 고정단교각에 내진분리베어링(Seismic Isolation Bearing)을 사용하여 지진에 의한 수평력을 감소시키거나 고정단교각의 연성능력을 향상시키는 방안 또는 고정단교각의 변위를 허용연성 범위내로 제한하는 방안등을 고려할 수 있다.

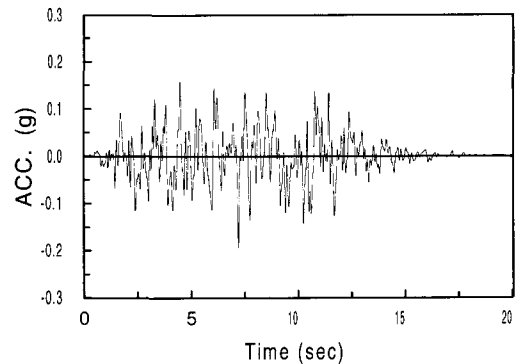
4.2 고유주기가 긴 교량의 경우

고정단교각의 높이가 높은 경우 고유주기를 장주기화 하여 교축방향 수평지진력을 감소시켜 내진성을 확보하는 내진분리베어링의 사용은 효과가 없다. 따라서 이와같은 경우는 이동제한장치를 사용하여 변위를 제한하는 것이 고정단교각의 내진성확보 방안으로 고려할 수 있다.

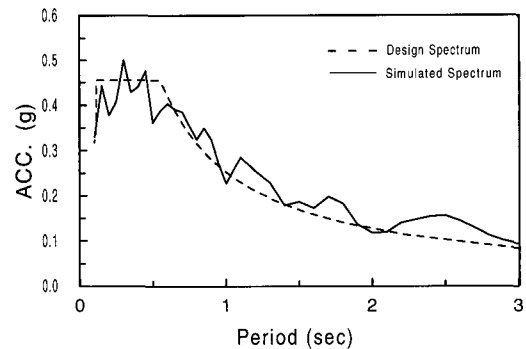
그림 8과 같은 일점고정 다경간연속교에서 교각의 높이가 20m인 경우 교량의 교축방향 고유주기는 3.17초이고 그림 9의 설계응답스펙트럼에 따른 탄성수평지진력은 478ton으로서 교각의 단면휨강도 290ton을 초과한다. 따라서 설계지진 작용시 고정단교각 하부에 소성힌지

가 발생하며 내진안전성을 위해서는 응답수정 계수 $R=1.65(478/290)$ 에 상응하는 변형성능이 확보되어야 한다.

교각의 하중-변위 관계곡선을 탄-소성거동으로 가정하면 고정단교각의 하중-변위곡선은 그림 10과 같다.



(a) 인공시간이력 지진파



(b) 설계 응답스펙트럼

그림 9 설계지진

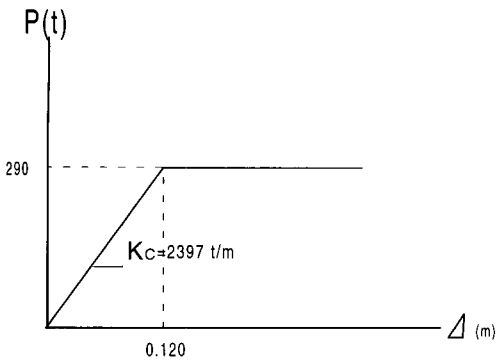


그림 10 교각의 하중-변위곡선

고정단교각의 양측 인접교각에 이격거리 0.08m 인 교축방향 이동제한장치가 설치되어 있는 경우 2장에서 기술한 바와같이 전체 시스템의 하중변위곡선은 그림 11과 같다. 이때 인접교각의 하중-변위관계는 고정단교각과 같은 경우를 고려하였다.

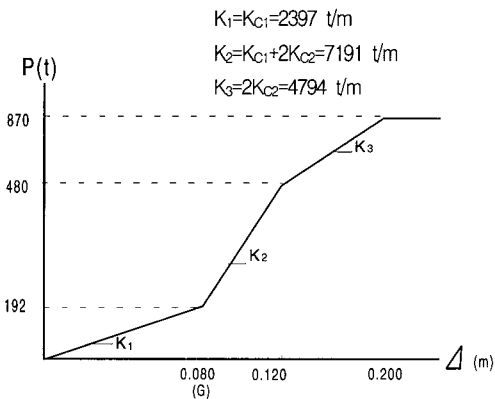


그림 11 등가탄성해석을 위한 하중-변위 관계곡선

표 3 등가탄성해석결과

단 계		Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4
1	Δ_a	0.1	0.157	0.150	0.151
2	P_a	386.4	660.2	628.5	630.7
3	K_E	3864	4211	4184	4186
	T	2.5	2.4	2.41	2.41
4	P_c	605.8	632.5	630	630
	Δ_c	0.157	0.150	0.151	0.151

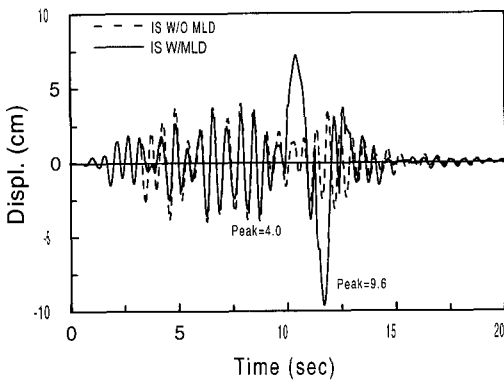
이격거리가 주어진 경우 최대변위를 구하기 위해서 2장에서 제시한 절차에 따라 등가탄성 해석을 단계별로 수행하면 표 3과 같다.

표 3으로부터 이격거리가 0.08m인 경우 Δ_a 가 Δ_c 에 수렴할 때까지 반복계산하면 $\Delta_{max}=0.151m$ 가 됨을 알 수 있다. 이값에 따른 변위연성비는 $\mu=0.151/0.12=1.25$ 로서 설계지진 작용시 고정단교각의 손상정도는 작다. 이때 이동제한장치가 설치된 가동단교각의 교축방향 수평변위는 $0.151-0.08=0.071m$ 로서 항복변위 0.120m보다 작으므로 가동단교각은 탄성거동을 하게된다. 따라서 등가 탄성해석방법은 비선형동적해석 대신 이동제한장치의 위치 및 이격거리를 결정하는데 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

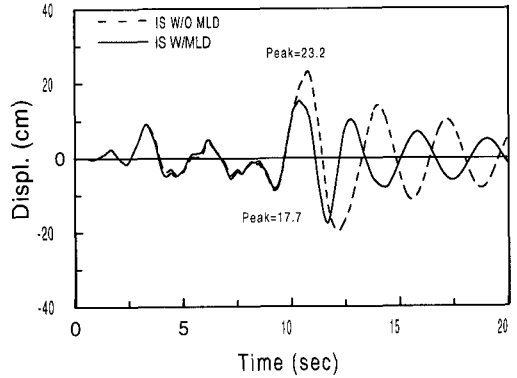
등가탄성해석 결과를 비선형동적해석 결과와 비교하기 위하여 그림 9(a)의 설계응답스펙트럼에 상응하는 지반가속도 시간이력을 사용하여 비선형동적해석을 수행한 결과는 그림 12와 같다.

그림 12로부터 등가탄성해석 결과와 비선형동적해석 결과의 고정단교각 최대변위는 14.7%의 오차가 있음을 알 수 있으며 이는 그림 9(b)의 설계응답스펙트럼과 모의시간이력에 따른 응답스펙트럼의 차이에 기인된 것으로 판단된다. 또한 고정단교각과 가동단교각의 변위 차이는 이격거리가 됨을 알 수 있다.

이동제한장치가 설치되어 있는 교각의 강성에 따른 효과를 고찰하기 위하여 교각의 높이별로 최대변위를 구하여 표 4에 나타내었다.



a) 고정단교각 변위



b) 가동단교각 변위

그림 12 비선형동적해석 결과 (H=20m, G=0.08)

표 4 이동제한장치가 설치된 교각의 높이에 따른 최대변위 (이격거리 G=0.08m)

교각높이 (m)	P_y (t)	Δ_y (m)	K_c (t/m)	고정단 변위 (m)	가동단 변위 (m)
7	827	0.015	55133	0.088	0.008
10	579	0.030	19300	0.099	0.019
16	362	0.077	4701	0.128	0.048
20	290	0.120	2397	0.151	0.071

표 4로부터 고유주기가 긴 교량의 경우 이동제한장치를 설치함에 따른 응답특성을 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 고유주기가 긴 교량의 경우 교축방향 이동제한장치를 설치함으로써 변위제한효과를 통한 고정단교각의 손상을 줄일수 있다.
- 2) 교축방향 수평변위 감소효과는 이동제한장치가 설치된 교각과 고정단교각의 강성비가 클수록 크다.

이상의 결과로부터 교축방향 이동제한장치를 상부구조의 신축량과 이동제한장치가 설치되는 하부구조의 강성과 강도를 고려하여 적절한 설치 위치와 이격거리를 결정함으로써 일점고정 다경간연속교의 내진성능을 향상시킬 수 있을 것이다.

4.3 내진분리베어링을 사용한 경우

일점고정 다경간연속교에서 고정단교각의 높이가 낮아 고유주기가 짧은 경우 고정받침 대

신 내진분리베어링을 사용하여 고유주기 이동을 통한 수평지진력을 감소효과를 얻음으로서 교각의 내진성을 확보할 수 있다. 기존 연속교의 경우에는 여러개의 받침교체가 필요한 교축방향 수평력 분산개념 보다는 고정단 받침만을 내진분리베어링으로 교체하는 것이 경제적이다. 이 경우 내진분리베어링의 강성이 작은 경우 과도한 교축방향 수평변위의 발생으로 받침의 안정성과 받침지지길이 확보가 문제가 될 수 있다. 따라서 내진분리베어링을 사용하는 경우 교축방향의 과도한 변위를 제한하기 위하여 이동제한장치를 사용할 수 있다.

그림 8의 대상교량에 있어서 고정단교각의 높이가 7m인 경우 교각의 하중-변위곡선은 그림 13(a)와 같고 여기서 사용한 내진분리베어링의 특성은 그림 13(b)와 같다. 또한 이동제한장치에 작용하는 충격력을 완화하기 위하여 사용한 완충재는 그림 14와 같다.

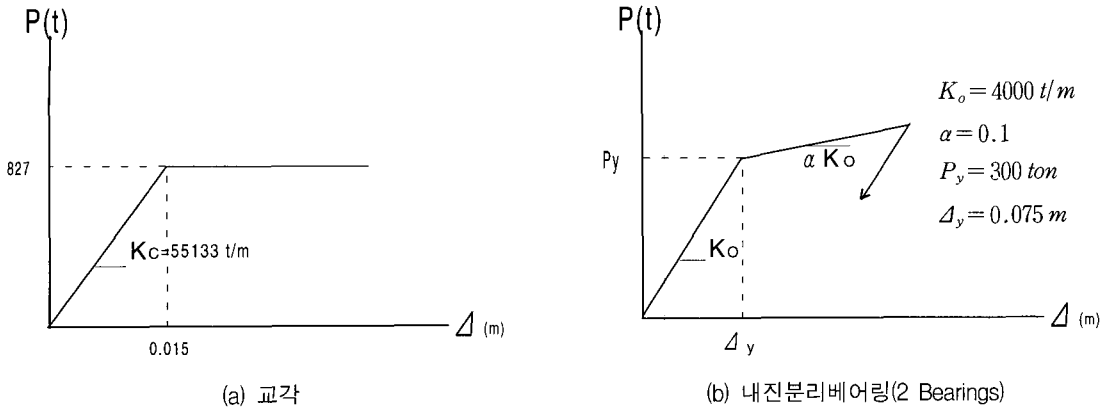


그림 13 교각 및 내진분리베어링의 하중-변위곡선

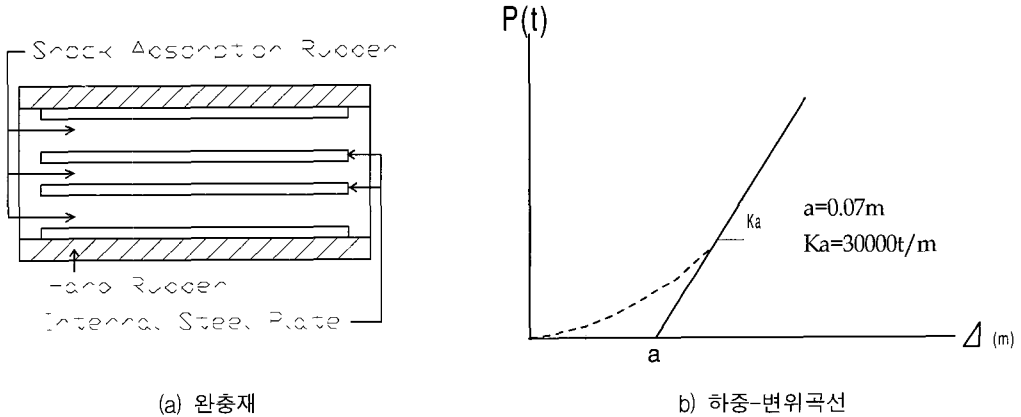


그림 14 완충재와 하중-변위곡선

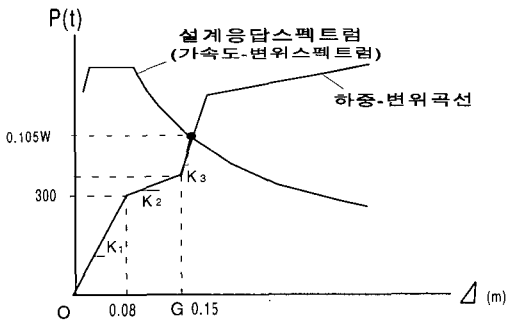


그림 15 가속도-변위스펙트럼 및 하중-변위곡선

하에서 이동제한장치가 일방향 변위제한 역할을 하는 경우 최대변위가 15cm가 되도록 이동제한장치의 이격거리 G를 3장의 절차에 따라 구하면 그림 15와 같다.

그림 15의 가속도-변위스펙트럼에서 최대변위 0.15m에 상당하는 설계지진력은 0.105 W로서 상부구조 총중량이 6020ton인 대상교량에서는 632ton이 된다. 따라서 그림 15상의 다음 관계식으로부터 이격거리를 구한다.

$$300 + K_2 \cdot (G - 0.08) + K_3(0.15 - G) = 0.105W$$

여기서,

이상과 같은 교각, 내진분리베어링, 완충재의 특성을 고려하여 그림 9와 같은 설계지진

$$K_1 = \left(\frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_o} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{55133} + \frac{1}{4000} \right)^{-1}$$

$$= 3729t/m$$

$$K_2 = \left(\frac{1}{K_c} + \frac{1}{aK_o} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{55133} + \frac{1}{400} \right)^{-1}$$

$$= 397t/m$$

$$K_3 = K_2 + \left(\frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_a} \right)^{-1}$$

$$= 397 + \left(\frac{1}{55133} + \frac{1}{30000} \right)^{-1} = 19825t/m$$

W= 6020ton

이상으로부터 G=0.134m를 구할 수 있다. 이동 제한장치의 이격거리는 완충재의 하중-변위특성인 그림 14(b)의 a=0.07m를 고려하여 결정한다.

5. 결 론

본 연구에서는 중간교각의 이동제한장치 또는 교대에 의하여 이동제한을 받는 내진분리 교량 및 고유주기가 긴 연속교의 최대발생변위를 계산할 수 있는 등가탄성해석방법과 가속도-변위응답스펙트럼 개념에 따른 이동제한장치의 설계방법을 제시하였다. 여기서 제시된 방법은 매우 간단하여 실무적으로 이동제한장치의 설계에 유용하게 사용할 수 있을 것이다. 그러나 여기에서 제시된 방법은 감쇠비 5%에 해당하는 설계응답스펙트럼을 사용하므로 이동제한장치가 설치된 하부구조가 비탄성거동을 하는 경우는 비탄성거동에 따른 에너지 감쇠효과가 고려되지 않아 최대발생변위를 과대평가 하게된다. 따라서 이와 같은 경우는 비선형동적해석을 수행함이 바람직하다.

향후 이동제한장치 연결부의 설계를 위해서 완충재가 있는 이동제한장치의 충격력에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. Mayes, R. L., Buckle, I. G., Kelly, T. E., and Jones, L.R., "AASHTO seismic isolation design requirements for highway bridges," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, No. 1, January, 1992, pp. 284-303.
2. Priestley, M.J.N., Seible, F., and Calvi, G. M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley&Sons Inc., 1996.
3. Kawashima, K., Mac Rae, G. A., Hoshikuma, J., and Nagaya, K., "Residual displacement response spectrum," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No. 5, May, 1998, pp. 523-530.
4. Allred, B.A. and Shepherd, R., "Ultimate restraint considerations in base-isolated bridges," *Proceedings from the 3rd U.S.-Japan Workshop on Earthquake Protective Systems for Bridges*, 1994, Berkeley, California.
5. Goto, Y., Kikuchi, T., Kimishima, T., Matsumoto, F., Ozaki, D., and Tsukamoto, A., "Development of expansion joint, stopper and knock-off abutment for menshin bridges," *Proceedings from the 2nd U.S.-Japan Workshop on Earthquake Protective Systems for Bridges*, Tsukuba, Japan, 1992, pp. 255-273.
6. Trochalkis, P., Eberhard, M. O., and Stanton, J. F., "Design of seismic restrainers for in-span hinges," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No. 4, April, 1997.
7. Bracci, J. M., Kunnath, S. K., and Reinhorn, A.M., "Seismic performance and retrofit evaluation of R.C structures," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No. 1, January, 1997.