

이동제한장치가 있는 교량의 지진응답특성

Seismic Response Characteristics of the Bridges with Motion-Limiting Devices

이 지 훈*
Lee, Ji-Hoon

전 귀 현**
Juhn, Gui-Hyun

요 지

본 연구에서는 이동제한장치가 있는 연속교의 지진응답특성을 고찰하였다. 일점고정연속교에 있어서 이동제한장치는 교각이 탄성거동을 하는 경우 교축방향 수평력 분산기능이 있으며 교각하부에 소성힌지가 발생하거나 내진분리베어링이 있는 경우에는 최대변위 및 비탄성거동에 따른 잔류변위제한에 매우 효과적이다. 상부구조와 이동제한장치의 충돌시 발생하는 충격력은 완충재의 사용으로 상당히 감소 시킬 수 있다. 이동제한장치의 설치위치 및 이격거리는 이동제한장치가 설치될 하부구조의 강성 및 강도와 온도변화, 급제동력, 작은 지진발생시 충돌여부, 신축이음장치유간 등을 고려하여 결정되어야 한다.

핵심용어 : 이동제한장치, 내진분리베어링, 잔류변위, 충격력

Abstract

This paper deals with the dynamic responses of the multi-span continuous bridge with the longitudinal motion-limiting devices. It is motivated by a need to understand the effects of the motion-limiting devices which may be used for the distribution of the longitudinal seismic force and limiting superstructure displacement. The results show that the motion-limiting devices can be used for reducing the maximum and residual displacements of the bridges with inelastic elements such as isolation bearings and plastic hinge formed in pier. The impact force at the motion-limiting device can be reduced significantly by using the shock absorber. The gap size and the place of the motion-limiting devices should be determined considering the stiffness and strength of the substructure where the devices are installed, and the normal movements due to thermal change, traffic vibration and braking, or small earthquake shaking.

Keywords : Motion-Limiting Devices, Seismic Isolation Bearing, Residual Displacement, Impact Force

1. 서 론

국내의 연속교는 대부분 일점고정 다경간연속

교로서 받침장치의 구성은 교축방향으로 하나의 고정지점과 마찰계수가 작은 가동받침들로 되어 있다. 이와 같은 일점고정 연속교는 교축방향 지

* 정회원·시설안전기술공단 진단1본부
** 정회원·시설안전기술공단 진단1본부 실장, 공학박사

• 이 논문에 대한 토론을 1999년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1999년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

반운동하에서 고정단 하부구조에 대부분의 상부구조 관성력이 집중되게 된다. 따라서 일점고정 연속교 고정단교각에는 중·소 규모의 지진하에서도 교축방향으로 상당히 큰 지진력이 작용하게 된다. 이와같은 지진력에 대하여 탄성범위에서 저항토록하는 것은 설계지진하중의 발생가능성을 고려할 때 비경제적, 비합리적이다. 따라서 붕괴방지수준의 설계지진에 대해서는 교각의 비탄성거동을 허용하는 것이 현재 교량 내진설계의 추세이다. 또한 고정단교각에 작용하는 교축방향 수평력의 분산 또는 저감을 목적으로 내진분리베어링의 사용이 증가 추세에 있다¹⁾. 내진분리시스템은 교량의 상·하부구조 사이에 수평강성이 작은 베어링을 사용하여 장주기화를 통한 수평력 감소효과를 얻는다. 이와같은 경우 수평변위가 수반되게 되는 바 이를 감소시키기 위하여 다양한 에너지 감쇠장치가 사용된다.

고정단교각 하부의 비탄성거동이 발생하는 경우와 내진분리베어링을 사용하는 경우 비탄성거동에 따른 수평변위 및 지진후 영구잔류변위를 제한할 필요가 있다^{2), 3)}. 수평변위는 받침지지길

이에 따른 낙교방지와 내진분리베어링의 안정성 확보를 위하여 제한되어야 하며 영구잔류변위는 지진발생후 비탄성거동에 따른 손상부의 보수가 가능한 범위내로 제한되어야 한다.

최대수평변위 및 영구변위를 제한하기 위한 이동제한장치는 양측교대 또는 중간 가동단교각에 설치가 가능하며 온도변화, 차량의 급제동력, 기능수행수준의 지진등에 대한 이동은 허용하고 붕괴방지수준 이상의 지진에 대해서는 변위제한 역할을 할 수 있어야 한다⁴⁾.

본 연구에서는 이동제한장치가 있는 경우 연속교의 지진응답특성을 비선형동적해석을 통하여 고찰하였다.

2. 대상교량

본 연구의 대상교량은 경간장이 40+50@4+40=280m인 6경간 P.S.C Box Girder 연속교로서 그림 1과 같으며 상, 하부구조의 특성은 표 1과 같다. 총 7개 교각중 P₄는 고정단교각이고 인접교각인 P₃, P₅에 그림 1(b)와 같은 이동제한장치(Motion-Limiting Device, MLD)가 설치되어 있다.

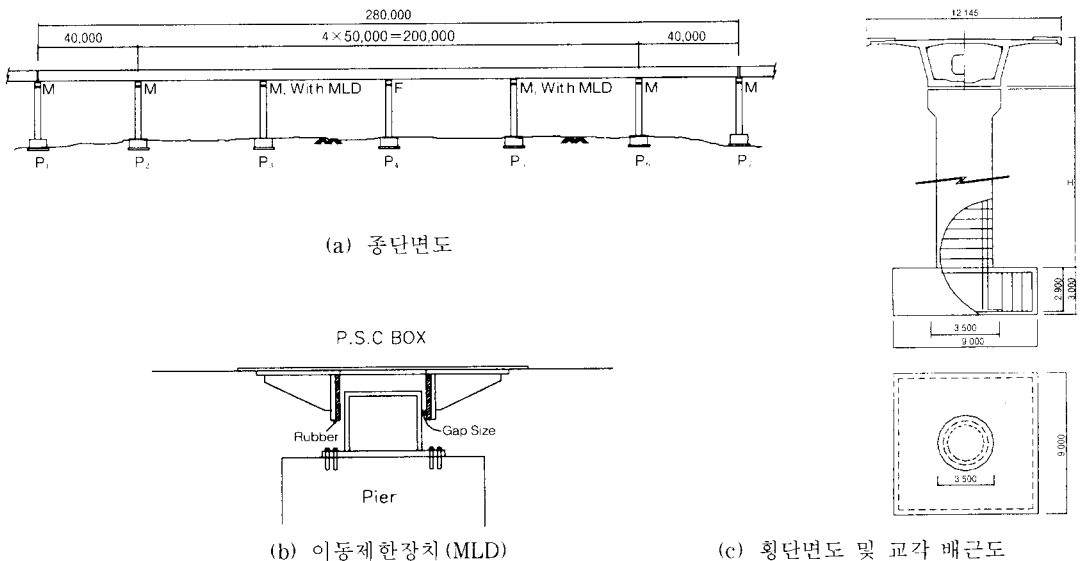


그림 1 대상교량

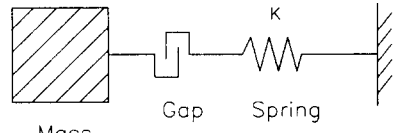
표 1 상부구조 및 하부구조 특성

상부구조	차 선 수	2차선 (교폭 12.145m)
	단 위 m 당 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
하부구조	형 식	T형 원형교각
	코 평 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
	항복응력 (σ _y) (σ _{ck})	3000 (SD30) kgf/cm ² 240 kgf/cm ²
	사 용 주 철근	D29 × 104
	사 용 띠 철근	D13, S=300mm
	주 철 근 비	0.7 %
	콘크리트덮개	100mm
기 초	형 식	직접기초
	지반반력계수 (K _v)	587,250 t/m
	(K _h)	187,250 t/m
	(K _r)	396,393 t/m

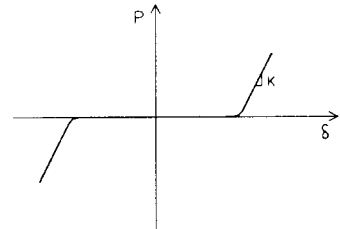
3. 비선형 동적해석

3.1 해석모델

교축방향의 지진을 고려하여 3자유도 (U_x, U_z, R_y)를 가지는 2차원 평면골조 모델링을 하였으며, 해석프로그램은 범용 구조해석 프로그램인 SAP2000 Nonlinear⁵⁾를 사용하였다. 모델 교량을 해석하기 위해 상부구조(주형) 및 하부구조(교각)은 범요소로 모델링하였으며, 받침부에 비선형 성질을 가진 Gap과 Hook 요소를 사용하여

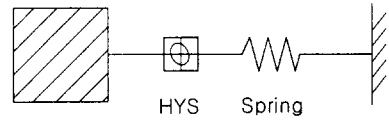


(a) 수학적 모델

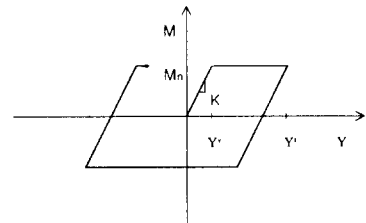


(b) 하중-변위 관계곡선

그림 3 Gap 요소의 수학적 모델 및 거동특성



(a) 수학적 모델



(b) 모멘트-회전각 관계곡선

그림 4 Plastic 요소의 수학적 모델 및 거동특성

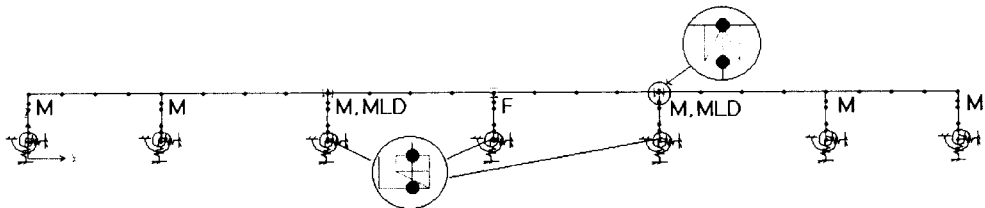


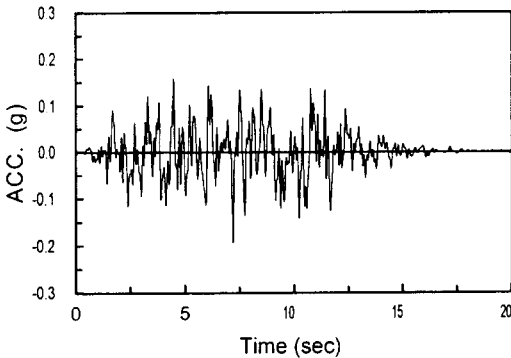
그림 2 대상교량의 모델링

이동제한장치를 모델링하였다. 이동제한장치 모델링은 이격거리 (Gap Size) 까지는 자유단으로 거동하며, 이격거리 이후 즉 상부구조와 이동제한장치가 접촉된 이후에는 그림 3의 모델상 스프링 강성 (K)에 의해 저항된다.

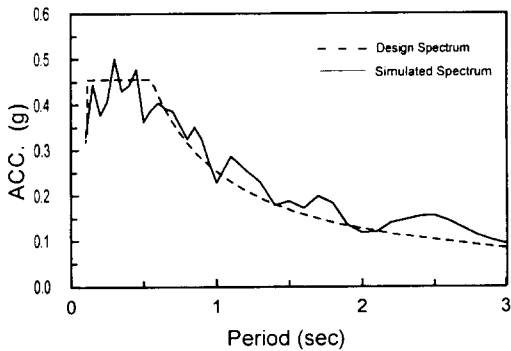
또한 고정단교각 및 이동제한장치가 설치되어 있는 가동단 교각하부에 소성힌지가 생기는 부분에 비선형 성질을 가진 Plastic 요소를 고려하였다.

3.2 입력지진하중

비선형 동적해석을 위한 입력지진하중은 그림 5(b)의 설계응답스펙트럼에 상응하는 모의지반가속도 시간이력을 사용하였다.



(a) 인공시간이력 지진파



(b) 설계 응답스펙트럼

그림 5 입력지진하중

3.3 응답특성

3.3.1 교각의 탄성거동시

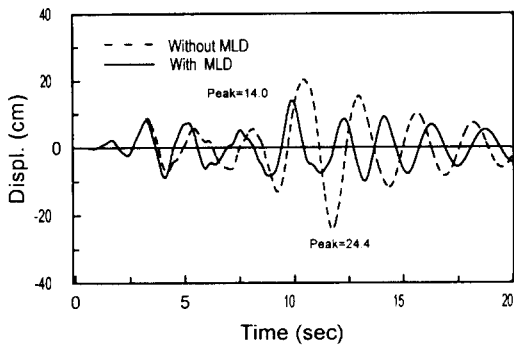
대상교량의 이동제한장치 설치에 따른 시간이력 해석결과 대표적인 응답시간이력은 그림 6과 같다. 대상교량의 1차 고유주기는 2.56초이고 이동제한장치의 이격거리는 5cm인 경우이다.

그림 6(a), (b)에서 보듯이 상부구조의 최대변위가 24.4cm에서 14.0cm로 감소하였으며 이에 따라 고정단교각의 전단력이 915ton에서 599ton으로 감소된다. 그러나 이동제한장치를 설치한 가동단교각의 전단력은 146ton에서 438ton으로 증가된다. (그림 6(c)) 이는 이동제한장치의 충격으로 인하여 가동단교각에 작용하는 수평력이 증가하기 때문이다.

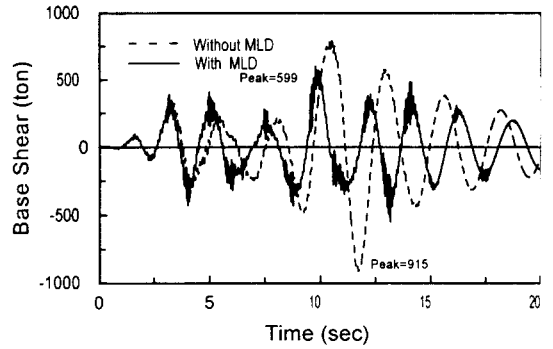
그림 6(b)의 고정단교각에 발생하는 전단력을 살펴보면 고정단과 상부구조가 형성하고 있는 진동단위의 1차 고유주기에 해당하는 응답이 지배적이고 충격에 의한 고주파수의 응답성분은 상대적으로 작음을 알 수 있다. 또한 그림 6(c)의 가동단교각에 발생하는 전단력은 고주파수의 응답이 지배적임을 알 수 있다. 이러한 응답특성은 고정단교각이 이루고 있는 진동단위와 가동단교각의 진동단위의 고유주기 차이에 의한 것으로서 고유주기가 작은 가동단교각이 고주파수성분의 충격력에 의한 영향이 크기 때문이다.

그림 6(d)와 (e)의 상부구조 가속도와 이동제한장치의 충격력의 크기는 해석모델상 Gap요소 즉 완충재의 강성(K)에 따라 크게 좌우되며 이에 대한 특성을 고찰하기 위하여 완충재의 강성에 따른 계산을 수행하였으며 그 결과는 그림 7과 같다.

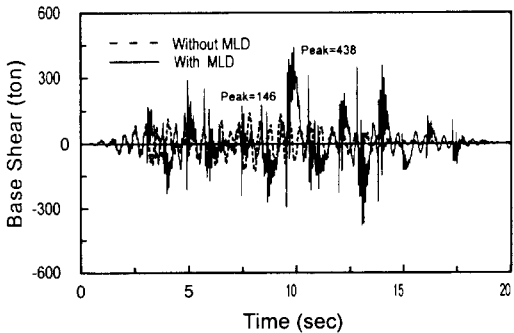
그림 7(a), (b)에서 알 수 있듯이 상부구조의 변위와 교각전단력은 K가 10⁴이상인 경우 거의 변화가 없으나 상부구조와 이동제한장치 사이의 충격력의 최대크기는 그림 3의 해석모델상 스프링강성(K)이 클수록 그림 7(c)와 같이 증가한다. 이러한 충격력의 증가는 완충재의 강성(K)이 클수록 충격시간 (Impact Duration)이 짧아지기 때문이다⁶⁾. 따라서 고무 등의 완충재를 사용하여 강성을 조절하면 이동제한효과를 유지하는



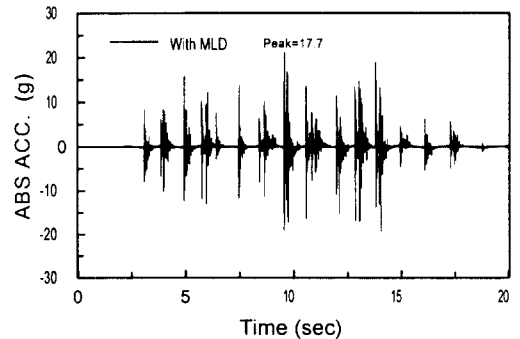
(a) 상부구조의 변위



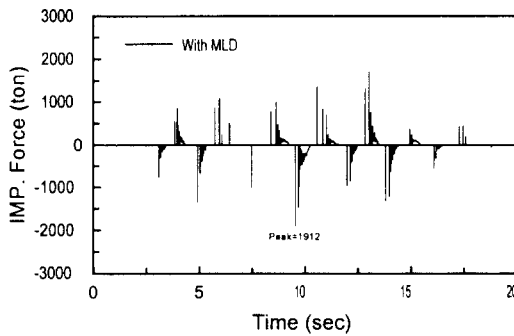
(b) 고정단 교각 밑면전단력



(c) 가동단 교단밑면전단력



(d) 상부구조 가속도



(e) 이동제한장치 충격력

그림 6 응답시간이력

범위에서 충격력을 상당히 완화시킬 수 있음을 그림 7로부터 알 수 있다.

이동제한장치의 이격거리에 따른 최대응답을 비교하기 위해 고유주기가 2.56초인 교량을 대상

으로 이격거리비에 따른 상부구조의 변위와 고정단, 가동단교각의 전단력을 계산한 결과는 그림 8과 같다. 여기서 이격거리비 (G/δ_1)는 이동제한 장치의 이격거리와 일점고정인 경우 최대 탄성변

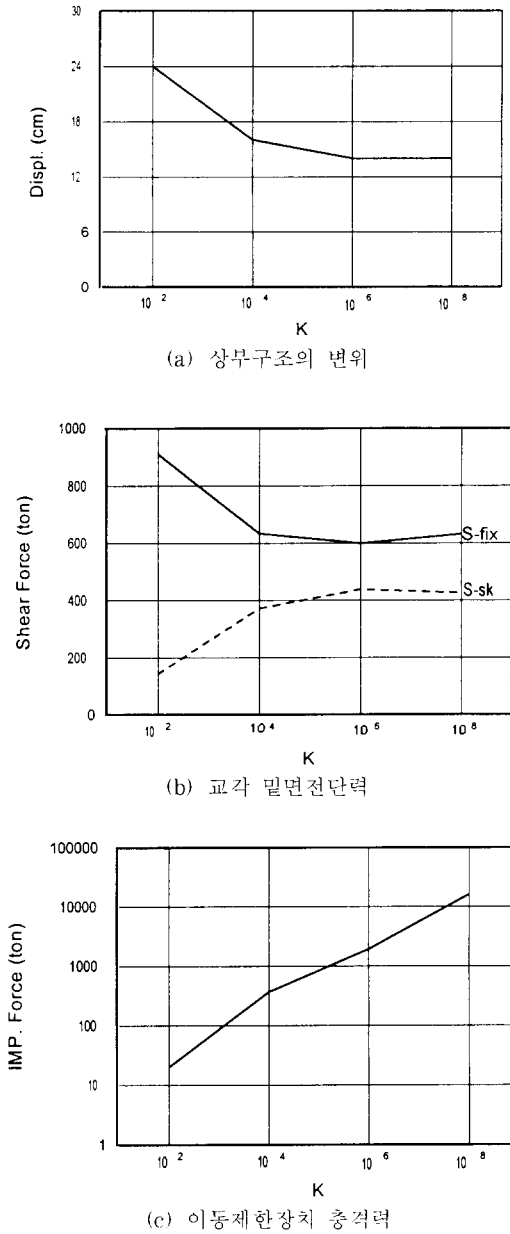


그림 7 Gap 요소의 강성에 따른 응답특성

위와의 비로 이격거리비가 0인 경우 3점고정에 해당되며 이격거리비가 1인 경우 일점고정 연속교에 해당된다.

이동제한장치를 설치한 경우 이격거리가 작을

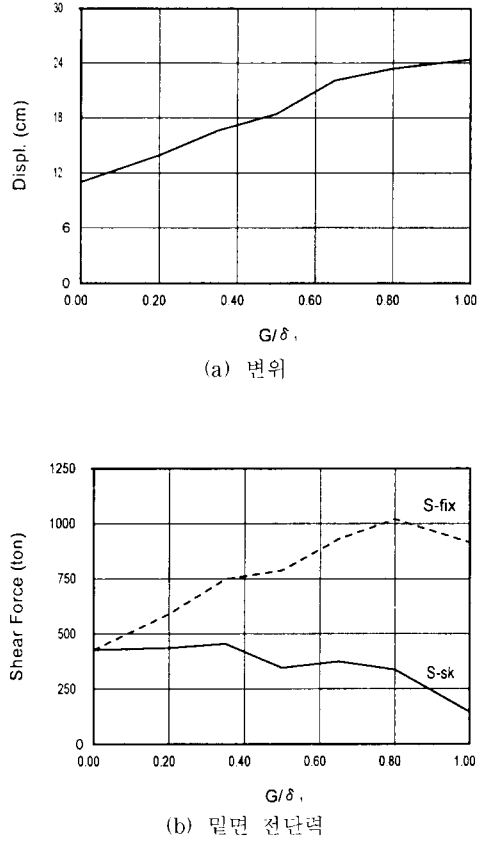


그림 8 이격거리비에 따른 응답

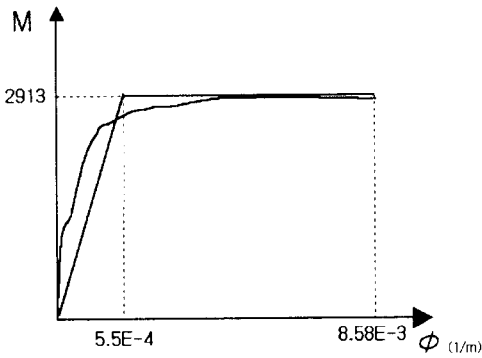
수록 상부구조의 변위 및 고정단교각의 전단력은 감소하며 그 한계값은 3점고정의 경우다. 가동단 교각의 경우 이격거리비의 감소에 따라 전단력이 증가되며 그 최대값은 3점고정의 경우가 된다. 온도변화에 따라 이동제한장치상의 이격거리 차이가 있는 경우 최대응답의 변화를 비교하기 위해 0℃, 10℃, 20℃, 40℃에 따른 해석을 수행하였다. 표 2는 이동제한장치 이격거리가 5cm인 교량에 온도 변화로 인해 고정단교각을 중심으로 좌우측 가동단교각(P₃, P₅)의 이격거리가 변할 때의 최대응답 결과이다.

표 2로부터 온도변화에 따른 이격거리 차이로 인한 상부구조의 변위 및 고정단교각의 전단력 변화는 10% 이내로 매우 적음을 알 수 있다. 이

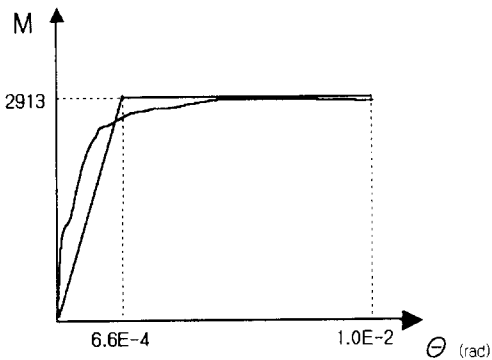
표 2 온도변화에 의한 이격거리 변화시 응답

경 우	상부구조 변 위	교각의 밑면전단력 (Base Shear)
	d (cm)	P_t (ton, 고정단)
CASE 1 ($\Delta T=0^\circ\text{C}$)	14.0	599
CASE 2 ($\Delta T=10^\circ\text{C}$)	14.2	600
CASE 3 ($\Delta T=20^\circ\text{C}$)	14.2	587
CASE 4 ($\Delta T=40^\circ\text{C}$)	12.7	561

는 고정단교각 양측의 이동제한장치가 온도차에 의한 이격거리 차이가 있는 경우도 동시에 이동제한 역할을 하는 경우와 응답특성이 거의 차이가 없음을 의미한다.



(a) 모멘트-곡률 (M-φ) 관계 곡선



(b) 모멘트-회전각 (M-θ) 관계 곡선

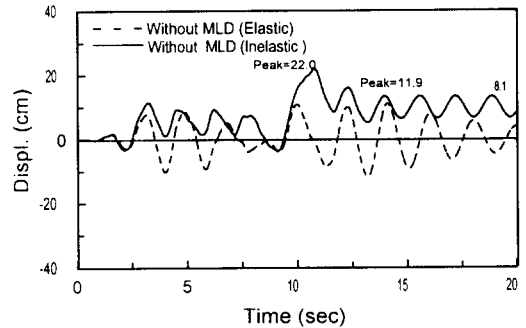
그림 9 교각단면의 특성 (D=3.0m, $P_t=0.7\%$)

3. 3. 2 교각의 비탄성거동시

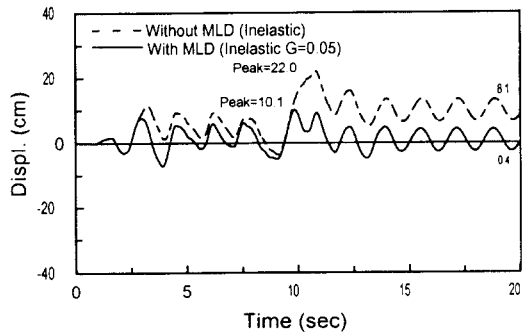
교각의 비탄성거동에 따른 응답특성을 고찰하기 위하여 교각의 단면휨강도와 변형특성을 그림 9와 같이 가정하여 해석을 수행한 결과는 그림 10과 같다.

그림 10(a)에서 보듯이 교각이 비탄성거동함에 따라 상부구조의 최대변위는 11.9cm에서 22.0cm로 증가되며 또한 영구잔류변위가 8.1cm가 발생함을 알 수 있다. 이와 같은 비탄성거동에 따른 최대변위 및 잔류변위는 초기강성, 단면강도, 입력지진의 특성에 따라 다를 수 있다.

그림 10(b)로부터 이동제한장치를 설치함으로써 최대변위는 22.0cm에서 10.1cm로, 잔류변위는 8.1cm에서 0.4cm로 감소함을 알 수 있다.



(a) 비탄성응답과 탄성응답

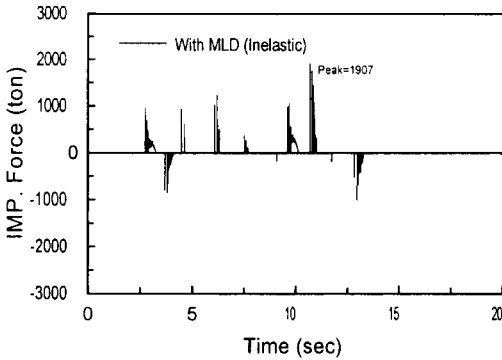


(b) 이동제한장치 유무에 따른 응답

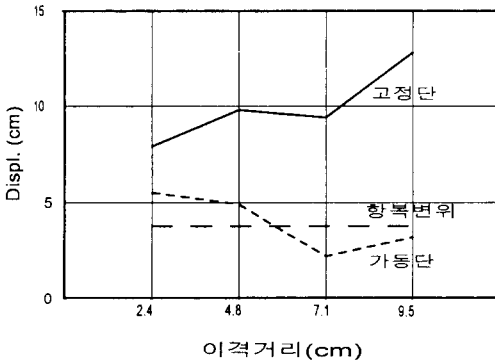
그림 10 교각 비탄성거동에 따른 상부구조변위

그림 11(a)는 이동제한장치에 작용하는 충격력이고 그림 11(b)는 이격거리에 따른 고정단교각(상부구조)의 최대변위를 계산한 결과이다. 이동제한장치에 작용하는 충격력은 탄성거동시와 같이 상당히 크게 발생하나 이는 3.3.1에서 논한 바와 같이 완충재의 강성에 따라 크게 좌우된다.

그림 11(b)로부터 이격거리가 5.5cm이상인 경우 이동제한장치가 설치된 가동단교각의 변위는 항복변위 이하가 되므로 탄성범위내에 있음을 알 수 있다. 따라서 이동제한장치의 설치위치 및 이격거리를 적절히 선택함으로써 이동제한장치가 설치된 하부구조의 손상을 초래함이 없이 고정단교각의 비탄성거동에 따른 최대변위 및 영구 잔류변위를 제한할 수 있다.



(a) 이동제한장치 충격력



(b) 이격거리에 따른 최대변위

그림 11 이동제한장치에 따른 응답

3. 3. 3 내진분리베어링의 사용시

교각의 높이가 낮은 경우 교각의 파괴모드는 전단파괴 또는 휨-전단파괴가 예상된다. 이와같은 경우는 교각의 강도증대 및 변형성능 향상을 통한 내진성능향상 방안은 비경제적이다. 따라서 작용수평력을 여러교각으로 분산하거나 저감할 수 있는 내진분리베어링의 사용이 효과적이다. 국내와 같은 중진지역에서는 교축방향의 지진력을 감소시키기 위하여 수평력분산 보다는 고유주기 이동을 통한 수평력 저감방안을 효율적으로 사용될 수 있다. 특히 기존교량의 내진성능향상은 수평력 분산개념은 다수의 교량받침교체를 요구하므로 고정단받침만을 내진분리베어링으로 교체하여 고유주기 이동을 통한 지진력감소효과를 얻을 수 있는 방안을 사용함이 바람직하다. 그림 1의 대상교량의 고정받침 대신 그림 12와 같은 특성을 가진 내진분리베어링이 사용된 경우 이동제한장치 설치에 따른 응답특성을 고찰하고자 한다.

그림 12와 같은 특성을 지닌 내진분리베어링이 고정받침대신 사용된 경우 이동제한장치 유무에 따른 응답은 그림 13과 같다.

그림 13(a)의 상부구조 변위응답으로부터 내진 분리된 교량에 이동제한장치가 있는 경우(IS W/MLD) 상부구조 최대변위가 20.6cm에서 11.7cm로 감소되고 잔류변위도 감소함을 알 수 있다. 그림 13(b)로부터 내진분리베어링의 사용으로 고정단교각의 전단력이 비분리 경우(UI) 1986ton에서 235ton으로 상당히 감소되며 이동제한장치가 있는 경우 최대변위가 감소함에 따라 전단력이

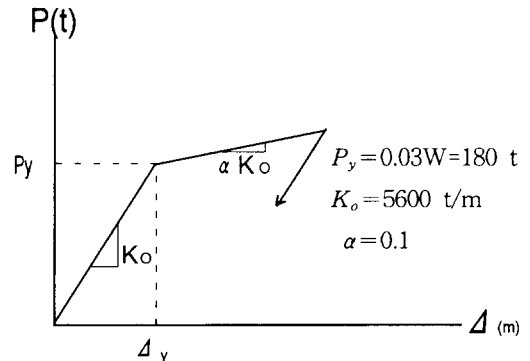
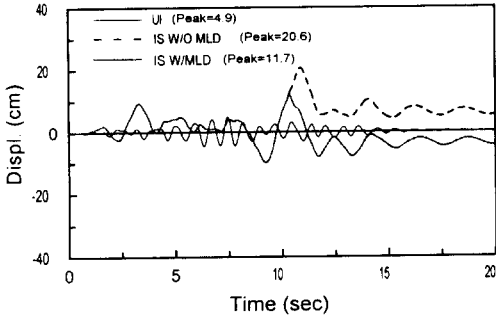
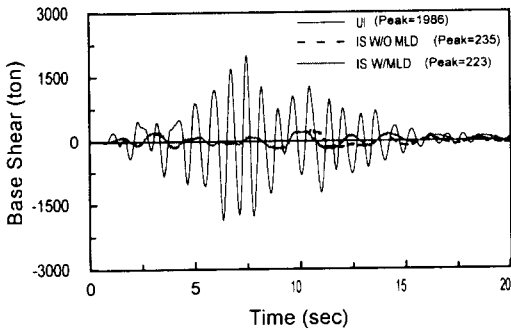


그림 12 내진분리베어링의 하중-변위곡선



(a) 상부구조변위



(b) 고정단교각 전단력

그림 13 내진분리베어링이 사용된 교량의 응답해석 결과

223ton으로 약간 감소함을 알 수 있다. 따라서 내진분리베어링이 사용된 경우 이동제한장치는 최대변위 및 잔류변위를 제한하는데 매우 효과적임을 알 수 있다. 단 이동제한장치가 설치되는 중간교각 또는 교대의 단면강도 범위내에서 이격거리를 정하는 것이 필요하다. 이 경우 이동제한장치에 작용하는 충격력과 이동제한장치의 이격거리에 따른 응답특성은 3.3.2절의 고정단교각이 비탄성거동을 하는 경우와 같다.

4. 결 론

본 연구에서 이동제한장치가 설치된 교량의 지진응답특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 일점고정 다경간연속교의 내진성능 향상을 위해서는

- 고정단교각의 변형성능을 향상시키는 방안
- 교량받침을 내진분리베어링으로 교체하는 방안

등을 고려할 수 있다. 이와 같이 교각의 비탄성 거동을 허용하거나 내진분리베어링을 사용하는 경우 이동제한장치의 사용으로 교각의 비탄성 거동 또는 내진분리베어링의 사용에 따른 수평변위 및 영구잔류변위를 제한함으로써 교량의 내진성능향상을 도모할 수 있다.

2) 이동제한장치의 변위제한 효과는 이격거리가 작을수록, 이동제한장치가 설치된 하부구조의 강성이 클수록 크나 이동제한장치가 설치된 하부구조의 강성과 강도 및 온도변화, 급제동력, 작은규모 지진발생시 충돌, 신축이음장치 유간 등을 고려하여 적절한 이격거리를 결정하여야 한다.

3) 이동제한장치에 작용하는 충격력은 이동제한장치의 강성에 크게 좌우되므로 적절한 완충재의 사용으로 상당히 감소시킬 수 있으며 이에 대한 연구가 향후 필요하다.

참 고 문 헌

1. R. L. Mayes, I. G. Buckle, T. E. Kelly, and L.R. Jones, "AASHTO Seismic Isolation Design Requirements for Highway Bridges", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, No.1, January, 1992, pp.284~303.
2. K. Kawashima, G. A. Mac Rae, J. Hoshikuma, and K. Nagaya, "Residual Displacement Response Spectrum", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No.5, May, 1998, pp. 523~530.
3. B.A. Allred and R. Shepherd, "Ultimate Restraint Considerations in Base-Isolated Bridges", *Proceedings of the 3rd U.S.-Japan Workshop on Earthquake Protective Systems for Bridges*, 1994, Berkeley, California.
4. Y. Goto, T. Kikuchi, T. Kimishima, F. Matsumoto, D. Ozaki, and A. Tsukamoto, "Development of Expansion Joint, Stopper and

- Knock-off Abutment for Menshin Bridges", *Proceedings of the 2nd U.S.-Japan Workshop on Earthquake Protective Systems for Bridges*, Tsukuba, Japan, 1992, pp.255~273.
5. SAP2000, *Analysis Reference*, Vol.1, 2, *Computers and Structures, Inc.*, Berkeley, California, 1996.
6. P. K. Malhotra, "Dynamics of Seismic Pounding at Expansion Joints of Concrete Bridges", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124, No.7, 1998, pp.794~802.
- (접수일자 : 1998. 11. 5)