

교량의 지진응답거동에 작용하는
액체점성감쇠기의 감쇠효과 분석
(Damping Effects of Fluid Viscous Dampers
on the Seismic Response of Bridges)

정상모*
Jeong, Sang-Mo

안창모**
Ahan, Chang-Mo

ABSTRACT

Fluid viscous dampers have been used as energy dissipators or STU's (Shock Transmission Unit) in earthquake resistant designs for bridges. Viscous dampers have many advantages compared to other friction type or visco-elastic type of dampers. They do neither increase internal pier forces due to their out of phase response, nor produce reaction forces at the low velocities associated with thermal movements. Therefore, they enable the super structure to restore itself perfectly after a severe movement due to seismic excitations.

This paper investigates the response of bridges designed with viscous dampers in regard to damping coefficients, properties of dampers, and arrangements of dampers. For this purpose, time-history dynamic analyses have been performed using a very simple model relevant to a typical bridge example. Based on the results, it presents some design guidelines on how to determine a proper damping ratio and on how to arrange dampers. In usual cases, damping coefficients corresponding to about 0.2-0.3 of damping ratios seem to be very effective in bridge designs.

1. 서론

점성감쇠기는 에너지분산 또는 충격전달을 목적으로 개발되어 건물이나 교량에서 지진에 대한 동적응답거동을 개선하기 위하여 사용되어왔다. 우리나라와 같이 중저지진 지역에서는 지진력이 상대적으로 크지 않으므로 충격전달장치로 활용하여 지진시에 교량을 다점고정방식으로 변경시켜 지진력을 분산 설계하는 것이 일반적이다. 지금까지 국내 교량에서 점성감쇠기를 충격전달이 아닌 에너지 분산용으로 활용한 사례는 흔하지 않다.

* 한동대학교 건설도시환경공학부 부교수, 정회원

** (주)에스코테크놀로지 기술연구소장, 정회원

일반적으로 충격전달을 통한 지진력의 분산 방식은 대체로 교량의 형상이 대칭적이고 교각의 크기 및 높이가 비슷한 규칙적인 교량에 유리하다. 그러나 교각의 높이가 균일하지 않고 교량 형상이 복잡하게 되면 단순히 지진력을 분산하는 것만으로는 효과적이지 않게 되어 이때에는 점성감쇠기를 에너지분산장치로 활용하는 것이 보다 효과적일 수도 있다.

본 논문에서는 우리나라와 같은 중저지진지역에서 점성감쇠기를 에너지분산장치로 활용할 경우 감쇠계수 크기, 감쇠기 특성, 감쇠기 배치 등이 지진시 교량의 응답거동에 미치는 영향을 분석 평가하였다. 이를 위하여 표준이 되는 교량을 채택하였으며, 이상의 변수들의 영향을 쉽게 파악할 수 있도록 단순한 모델링을 선정하여 시간이력 비선형 동적 구조해석을 수행하였다. 그 결과를 토대로 점성감쇠기능의 교량반침을 활용하여 교량의 내진설계를 수행할 때 도움을 줄 수 있는 설계 지침을 제시하였다.

2. 점성감쇠의 특성

점성감쇠기(Viscous Damper)는 유체흐름의 저항력을 활용한 것으로 감쇠기의 감쇠력 F_d 는 식 (1)과 같이 속도의 지수함수로 나타낸다.

$$F_d = c \cdot v^n \quad (1)$$

여기서, c 는 감쇠계수, v 는 속도를 나타내며, 지수 n 은 이상적인 감쇠기의 경우 1이나 실제로는 0.3-1.9정도의 크기를 갖는다. 이는 감쇠기를 형성하는 재료의 성질이나 조립방법이 완전하지 않으며 감쇠기내의 액체도 실제로는 압축성을 갖기 때문이다. 일반적으로 에너지분산용의 감쇠기는 0.5-1.0정도의 범위내의 값을 갖는 것으로 알려져 있다.

현재 내진설계에 사용되는 충격전달장치의 감쇠계수 c 는 1.0×10^6 t/(m/sec)를 상회하는 매우 큰 값인 것에 반하여 에너지 분산용으로 사용하는 감쇠기의 감쇠계수는 그보다 훨씬 작은 값으로서 다양한 크기를 갖도록 설계가 가능하다. 이들 감쇠기의 특성을 그림 1에 개념적으로 나타내었으며, 이때 1회 사이클당 분산되는 에너지 W_d 는 그림 2의 타원넓이와 같다.

점성감쇠기는 마찰감쇠기나 재료의 이력감쇠기와 비교할 때 다음과 같은 여러 장점을 보유하고 있다. 즉 점성감쇠기는 구조물의 강성도를 변화시키지 않으면서 에너지를 분산시키며, 구조물의 변형에 따르는 부재내력과는 거동시 위상이 다르므로 구조물의 변형력을 증가시키지 않는다.

또한 온도변화 등 낮은 속도의 변형에는 하중을 유발하지 않고 지진이나 갑작스런 충격하중에만 작용하며, 이러한 지진이나 충격 후의 변형상태에서 원상으로 복원하는 데 전혀 저항력이 작용하지 않는다.

특히 점성감쇠기는 과거 수십년간 사용되어 왔으며 비교적 용이하게 설치가 가능하고 신뢰성과 내구성이 비교적 높은 편이다.

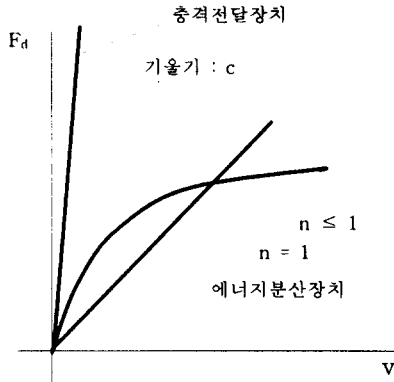


그림 1. 액체점성감쇠기의 특성

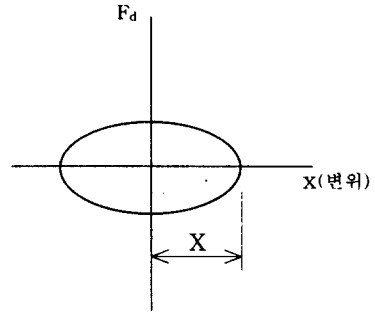


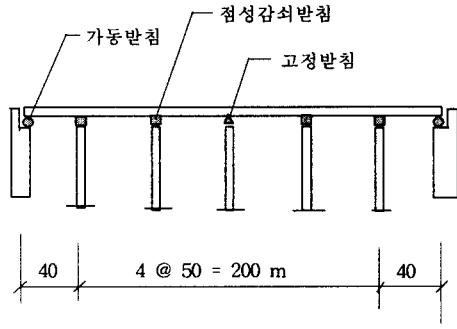
그림 2. 점성감쇠기의 에너지 분산

3. 해석모델링

점성감쇠기가 교량의 응답 거동에 미치는 영향을 분석 평가하기 위하여 채택한 교량의 예는 그림 3에서와 같이 6경간 연속교로서 총 연장이 280m이다. 상부 교량형식은 프리스트레스트 콘크리트 박스거더교이며, 하부구조로서 교각은 높이가 약 25m이고 장방형 박스단면을 갖고 있다. 교량의 받침조건은 중앙부 교각에서만 고정받침을 사용한 1점 고정방식으로서, 다른 교각들에서는 점성감쇠기능을 갖는 받침을 사용할 수 있으며, 양 교대의 받침들은 모두 가동받침이다. 교각당 설치된 받침의 수는 2기씩으로 감쇠기능은 교축방향으로만 갖되 교축 직각방향으로는 고정지지를 하는 것으로 가정하였다.

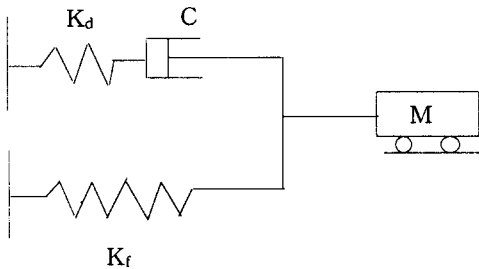
채택한 교량은 기하학적으로 비교적 규칙적인 형상을 갖도록 하여 감쇠계수의 변화에 따른 교량의 응답거동에 대한 평가를 용이하도록 하였다. 실제로 교각의 높이가 불규칙적으로 변화하는 등 작용 변수가 많을 때에는 응답거동의 경향을 일반화하기 어려울 때가 많다. 따라서 점성감쇠기에 의한 교량의 내진설계에서 최선의 결과를 얻기 위해서는 정형화된 공식이나 법칙에 의하기보다는 시산오차(Trial and Error)에 의해 설계되고 있는 실정이다.

실제 교량에서 점성감쇠기의 여러 변수에 대한 교량의 응답거동을 용이하게 파악하기 위하여 교량의 구조시스템을 이상적으로 단순화한 모델링을 그림 4와 같이 선정하였다. 그림 4의 단순화한 모델링은 형상이 불규칙한 교량에 대해서도 쉽게 적용할 수 있다. 즉 고정교각의 강성도와 점성감쇠기가 설치된 교각의 강성도는 개략적으로 $3EI/L^3$ 의 식에 의해 추정할 수 있으며, 질량 M도 상부구조의 총 중량을 추정하여 계산할 수 있다.



상부 박스거더 단면	
- 단면높이 :	3.5 m
- 상부플랜지 폭 :	12 m
- 상부플랜지 두께 :	0.3 m
- 하부플랜지 폭 :	5.5 m
- 하부플랜지 두께 :	0.35 m
- 웨브 두께 :	0.45 m
교각 박스 단면	
- 폭 :	4 m
- 깊이 :	3.5 m
- 두께 :	0.8 m

그림 3. 교량설계에



- M : 상부구조 총 질량
- K_r : 고정교각 강성도
- K_d = ∑k_d
: 감쇠교각 총강성도
- C = ∑c
: 감쇠기 총 감쇠계수

그림 4. 이상화한 단순모델

4. 해석조건

점성감쇠기에 의해 내진설계된 교량의 응답거동을 분석하기 위하여, 채택한 교량에 및 단순화한 모델링에 대하여 SAP2000-Nonlinear를 사용하여 비선형 동적 시간이력해석을 수행하였다. 시간이력해석의 입력지진은 최대 0.154g의 가속도에 지속시간 24초의 인공지진으로서 교량설계기준의 지반조건 2에 해당하는 응답스펙트럼에 부합되도록 생성된 것이다. 이렇게 생성된 인공지진을 본 해석에서 실제 적용할 때에는 지진격리장치로 가정하여 1.25 (=1.5/1.2)배로 증폭하였다.

해석조건으로는 다음과 같이 점성감쇠기의 감쇠계수, 감쇠특성, 감쇠기 배치교각 등을 고려하여 해석을 수행하였다.

일차적인 해석조건인 변수는 감쇠계수로서 고정교각의 강성과 상부구조의 총 질량을 기준으로 한계감쇠계수를 구하고 감쇠비에 상응하는 감쇠계수를 계산하여 해석하였다. 해석시 고려한 감쇠비 D 는 각각 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0 등의 값을 포함하였다. 또한 충격전달장치로서 점성감쇠기를 사용하여 교각과 일체로 거동하는 경우에 대한 해석도 수행하였다. 이상의 감쇠비에 대한 감쇠계수는 다음 식 (2)에 의하여 산정하였으며, 각각의 감쇠비는 원래부터 기본적으로 전체 교량시스템에 적용되는 감쇠비인 0.05와는 별도로 점성감쇠기에 의해 추가로 부여되는 감쇠비를 의미한다.

$$c=(2D)\sqrt{MK} \quad (2)$$

두 번째 해석조건으로는 감쇠기의 특성에 대한 고려사항으로서 감쇠력을 유발하는 감쇠지수 n 의 변화에 따른 교량의 응답거동 변화 특성을 파악하기 위하여 $n=0.5, 0.75, 1.0$ 에 대한 해석을 수행하였다.

마지막으로 점성감쇠기를 몇 개의 교각에 분배하여 배치할 것인지에 대한 해석조건으로서 교각 1기에 배치하는 경우와 교각 4기에 분산하여 배치하는 경우로 구분하여 해석하였다.

5. 해석결과 분석

교량의 응답 거동을 평가하기 위하여 해석조건별로 수행한 시간이력해석결과를 분석하였다. 분석항목은 고정교각의 수평력, 점성감쇠기를 설치한 교각의 수평력, 교량 상부구조의 변위, 속도, 가속도, 점성감쇠받침의 누적 에너지분산량 등을 포함하였다. 이들 결과에 대한 보다 용이한 평가를 위하여 그중 몇 개의 항목들은 그래프로 작성하여 그림 5에서 그림 7까지 나타내었다.

그림 5에 의하면 고정교각의 수평력은 점성감쇠기에 의한 추가감쇠에 의해 현저히 감소하여 응답거동이 크게 개선됨을 알 수 있다. 특히 감쇠비가 증가함에 따라 초기의 작은 감쇠에 의해서도 급격한 기울기로 수평지진력은 감소하여 효과적으로 작용한다. 대체로 감쇠비가 0.2-0.3에 상당하는 감쇠계수까지는 비교적 효과적으로 작용하다가 그 이후에는 완만히 변화하여 그 효과가 저하된다.

또한 점성감쇠기는 교각 상단에 설치되어 구조시스템내에 포함되는데도 감쇠비가 0.5 정도까지는 감쇠효과가 교각 강성도의 영향을 크게 받지 않음을 알 수 있다. 이것은 감쇠기를 설치하는데 있어서 에너지 분산용의 경우 굳이 여러 교각에 분배하여 설치할 필요가 없이 1-2개의 교각에만 설치하여도 매우 큰 효과를 얻을 수 있음을 의미한다.

이상과 같이 시간이력해석에 의한 결과를 분석하면 결국 감쇠비가 0.5정도까지 큰 감쇠비에 상응하는 응답스펙트럼을 작성하여 설계에 활용하여도 가능할 것으로 사료된다.

참조로 충격전달장치에 근접하는 큰 감쇠계수를 사용할수록 이체는 감쇠교각 및 고정교각의 수평력은 다시 증가한다. 이에 대한 주된 이유는 감쇠기가 설치된 교각도 고정점으로 작용하므로 응답주기가 감소하게되어 지진력이 증가하고, 또한 입력되는 지진에너지의 분산량이 감소하기 때문이다.

이상의 분석결과 특히 교량의 형상과 교각 높이가 불규칙한 경우 충격전달장치와 에너지 분산

장치를 병용하면 더욱 만족한 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

그림 6은 감쇠비의 특성으로서 감쇠지수가 각각 0.5와 1.0일 때에 대한 응답거동의 비교로서 감쇠비가 비교적 작은 경우의 감쇠효과가 $n=0.5$ 일 때 훨씬 더 효과적임을 알 수 있다. 이것은 우리나라와 같은 중저지진지역에서 교량의 거동속도는 대체로 1.0 m/sec보다 작은 값이므로 감쇠력은 $n=0.5$ 일 때가 $n=1.0$ 일 때보다 크게 작용한다. 따라서 흡수하는 에너지 양도 많게 되어 충분히 예상할 수 있는 결과이며 해석을 통하여 확인되었다. 결론적으로 작은 감쇠계수에도 큰 감쇠효과를 얻기 위해서는 상대적으로 n 값이 1보다 작은 값을 사용하는 것이 유리하다.

이상의 결과는 그림 7에 있어서도 명확히 확인할 수 있으며, 즉 감쇠비 $D=0.15$ 에 해당하는 같은 점성계수에 있어서도 $n=0.5$ 나 0.75값이 $n=1.0$ 보다 고정교각의 수평지진력을 감소시켜서 유리함을 알 수 있다.

또한 그림 6에서와 같이 지수 n 이 1보다 작게 되면 상대적으로 감쇠교각의 수평력은 더욱 크게 작용하므로 감쇠기를 여러 교각에 분산 배치하여 강성도를 증가시키는 것이 역학적으로는 유리한 결과를 얻는다. 그러나 추가 교각에 설치하기 위해서는 그에 따른 작업량과 소요 물량이 증가하므로 실제로 얻어지는 효과는 면밀한 비교 분석을 통하여 확인되어야 할 것이다.

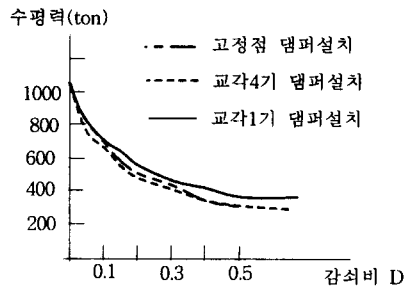


그림 5. 감쇠비-고정교각 수평력 관계($n=1$)

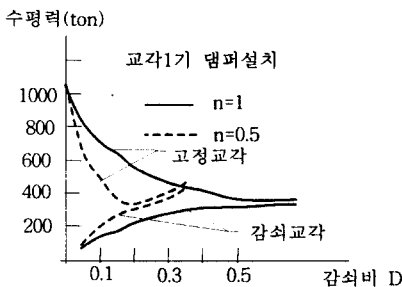


그림 6. 감쇠비-고정교각 수평력 관계

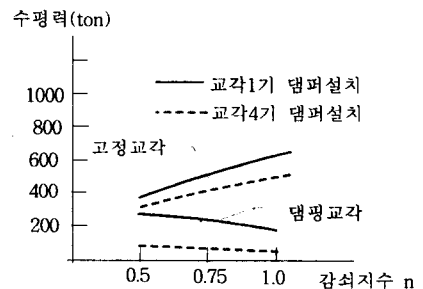


그림 7. 감쇠비-교각 수평력 관계 ($D=0.15$)

6. 결 론

이상과 같이 본 논문에서는 점성감쇠기능의 교량받침을 에너지분산용으로 활용하여 내진설계를 수행할 때 감쇠계수 크기, 감쇠기의 감쇠 특성, 감쇠기의 교각에 대한 배치 등이 교량의 응답거동에 미치는 영향을 분석 평가하였다. 이를 위하여 표준이 되는 교량과 이의 특성을 반영한 단순한 모델링을 채택하고 시간이력 비선형 동적 구조해석을 수행하여 그 결과를 분석하였다. 이러한 분석결과는 교량의 내진설계에 점성감쇠기를 활용할 경우 설계지침으로 도움을 받을 수 있는 설계 개념을 제시해 준다. 최종적인 분석 및 평가 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 에너지분산용 점성감쇠기를 활용하면 매우 작은 감쇠계수에 의해서도 응답거동에 있어서 큰 효과를 얻을 수 있다. 특히 감쇠비가 0.2-0.3 정도까지는 비교적 효과적으로 적용할 수 있으며 그 이상이 되면 감쇠효과는 감소한다.
- 2) 감쇠 특성으로서 감쇠지수 n 은 0.5나 0.75 등 1보다 작은 지수의 값이 작은 감쇠계수에 의해서도 보다 효과적으로 감쇠작용을 하여 교량의 응답거동을 개선한다. 그 주된 이유는 우리나라와 같은 중저지진지역에서는 지진응답 거동 속도가 1m/sec보다 작게되어 작은 지수가 큰 감쇠력을 유발하고 결과적으로 더 큰 입력 에너지를 분산하기 때문이다.
- 3) 감쇠비가 0.5보다 작은 값일 때는 감쇠기를 설치한 교각의 강성이 응답거동에 크게 영향을 주지 않으므로 굳이 여러 교각에 분산하여 설치할 필요는 없을 것이다. 또한 교각의 강성이 영향을 주지 않으므로 큰 감쇠비에 대한 설계 응답스펙트럼을 작성하여 설계에 적용하여도 충분히 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.
- 4) 큰 감쇠계수를 갖는 점성감쇠기는 충격전달장치로 작용하여 여러 교각에 지진력을 분산하는 작용을 하지만, 고정교각의 수평력은 오히려 증가시키기도 한다. 이는 감쇠기가 에너지를 분산시키지 못하고, 교량의 거동주기가 감소하여 지진력이 증가하기 때문이다.
- 5) 결론적으로 점성감쇠기를 에너지분산 또는 충격전달용으로 활용하여 교량의 내진설계가 가능하다. 그러나 한가지 활용방안만으로 설계기준을 만족하는 결과를 얻을 수 없을 때는 에너지분산과 충격전달을 병용하면 가능한 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 이때 간단한 모델링을 활용한 분석을 통하여 손쉽게 개략적인 교량의 거동을 파악하고 실제교량에는 최종 결과를 확인하는 차원에서만 적용하면 효율적으로 설계시간을 절감할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 김동석, 하동호, 고현무(1999), “중약진 지역에서의 지진격리교량에 대한 응답수정 계수,” 대한토목학회 학술발표회 논문집 (1), pp. 551-554.
2. 조상원, 김만철, 박선규, 이인원(1998), “비비례 감쇠시스템에 대한 효율적인 모드중첩법의 개발,” 대한토목학회 학술발표회 논문집 (1), pp. 471-474.
3. 고현무, 송준호(1998), “사용기간 비용 최소화를 통한 기초격리 교량의 최적 내진설계,” 대한토목학회 학술발표회 논문집 (1), pp. 499-502.

4. 정상모, 안창모(2000), "교량의 내진설계에 있어서 점성감쇠기능받침의 감쇠계수 영향평가," 한국지진공학회 추계 학술발표회 논문집, pp. 399-406
5. 한국지진공학회(2000), "도로교의 내진설계," 제6회 한국지진공학회 기술강습회.
6. Sun, C. T., and Lu, Y. P.(1995), "Vibration Damping of Structural Elements," Prentice Hall PTR, New Jersey.
7. Hanson, R. D., and Jeong, Sang-Mo(1994), "Design Procedure Utilizing Supplemental Energy Dissipation Devices for Improved Building Performance," Proceedings of Seminar on Energy Dissipation, EERI, Chicago.
8. Wilson, Edward L.(1999), "Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures," Computers and Structures, Inc. California.
9. Michel Bruneau, Chia-Ming Uang, and Andrew Whittaker(1998), "Ductile Design of Steel Structures,McGraw-Hill, New York.
10. M. J. N. Priestley, F. Seible, and G. M. Calvi (1996), "Seismic Design and Retrofit of Bridges," John Willey & Sons, INC., New York.
11. R. Ivan Skinner, William H. Robinson, and Graeme H. McVerry (1993), "An Introduction to Seismic Isolation," John Willey & Sons, INC., New York.