

Bang-Bang 형태의 제어를 갖는 복합제어

Hybrid Control with a Bang-Bang Type Controller

박규식* 정형조** 조상원* 이인원***
Park, Kyu-Sik Jung, Hyung-Jo Cho, Sang-Won Lee, In-Won

ABSTRACT

This paper presents a hybrid (i.e., integrated passive-active) system for seismic response control of a cable-stayed bridge. Because multiple control devices are operating, a hybrid control system could alleviate some of the restrictions and limitations that exist when each system is acting alone. Lead rubber bearings are used as passive control devices to reduce the earthquake-induced forces in the bridge and hydraulic actuators are used as active control devices to further reduce the bridge responses, especially deck displacements. In the proposed hybrid control system, a linear quadratic *Gaussian* control algorithm is adopted as a primary controller. In addition, a secondary bang-bang type (i.e., on-off type) controller according to the responses of lead rubber bearings is considered to increase the controller robustness. Numerical simulation results show that control performances of the hybrid control system are superior to those of the passive control system and slightly better than those of the fully active control system. Furthermore, it is verified that the hybrid control system with a bang-bang type controller is more robust for stiffness perturbation than the active controller with μ -synthesis method and there are no signs of instability in the overall system whereas the active control system with linear quadratic *Gaussian* algorithm shows instabilities in the perturbed system. Therefore, the proposed hybrid protective system could effectively be used to seismically excited cable-stayed bridges.

1. 서론

복합제어 시스템은 일반적으로 수동과 능동제어 장치가 결합된 것이다. 이러한 복합제어 시스템은 다각적인 제어장치를 사용하기 때문에 수동이나 능동 제어장치 한 종류만을 사용할 경우에 발생할 수 있는 문제점을 완화시킬 수 있다. 따라서 제어성능의 향상이 가능하고, 능동제어 시스템에 비해 신뢰성과 강인성(Robustness)이 뛰어나다.

복합 시스템은 현재까지 20여개의 건물과 10여개의 교량(시공중)에 실제 적용되었다⁽¹⁾. 복합질량감쇠기(HMD: Hybrid Mass Damper)는 토목 구조물에 적용된 가장 일반적인 복합 시스템이다. 복합질량감쇠기는 동조질량감쇠기(TMD: Tuned Mass Damper)와 능동제어 장치가 결합된 것이다. 이 시

* 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정
** 정회원·세종대학교 토목환경공학과 조교수
*** 정회원·한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

시스템은 주로 동조질량감쇠기로 인해 구조물의 응답을 감소시키고 추가적인 능동제어력은 복합질량감쇠기의 효율성과 강인성을 증가시킨다. 복합제어 시스템의 또 다른 형태는 지진격리 장치와 능동제어 장치가 결합된 능동 지진격리 장치이다. 이 시스템은 지진격리 장치의 변형을 감소시키면서 구조물에 전달되는 지진력을 감소시킬 수 있다.

사장교는 구조적인 효율성과 경제성 등으로 인해 세계적으로 건설이 증가하고 있다. 하지만 이러한 사장교는 낮은 구조감쇠를 갖는 매우 유연한 구조물이기 때문에 지진과 같은 동적하중에 취약하다. 사장교의 상판과 주탑의 연결형태는 사장교의 완공 후 지진으로부터 교량을 보호하기 위해 매우 중요하다.

본 연구에서는 납고무받침(LRB: Lead Rubber Bearing)과 Hydraulic actuator(HA)가 결합된 복합 시스템을 지진하중을 받는 사장교의 진동제어를 위해 사용하였다. 납고무받침은 교량에 전달되는 지진하중을 감소시키고 HA는 상판변위(납고무받침의 변형)와 같은 구조물의 응답을 추가적으로 감소시키기 위해 사용되었다. 제안된 복합 시스템은 LQG(Linear Quadratic Gaussian) 제어 알고리즘을 통해 제어력을 계산하고 납고무받침의 응답에 따라 계산된 제어력을 구조물에 가하는 bang-bang 형태(on-off 형태)의 제어 알고리즘을 사용하였다.

2. 복합제어 시스템

2. 1. 제어 장치

복합제어 시스템의 수동제어 장치로는 납고무받침을 사용하였다. 납고무받침의 주요기능은 구조물의 고유주기를 증가시키는 것이다(따라서 간물이나 단경간 교량에 특히 효과적이다). 사장교의 고유주기는 지진의 주된 에너지를 피할 수 있을 만큼 충분히 길지만 Ali 와 Abdel-Ghaffar는 납고무받침의 적절한 물성치와 설치위치에 따라 사장교의 응답이 감소함을 보였다⁽²⁾. 이것은 납고무받침속의 납에 의해 지진에너지가 소산되기 때문이다. 그러나 납이 항복한 후 납고무받침은 고무의 강성만을 가지므로 상판변위가 크게 발생할 수 있다. 이러한 증가된 상판변위(납고무받침의 변형)는 추가적인 수동감쇠기나 능동제어 장치를 설치하여 감소시킬 수 있다.

납고무받침의 설계는 Ali 와 Abdel-Ghaffar⁽²⁾에 의해서 제안된 방법을 따랐다. 설계과정에서 납의 항복 전단력은 $0.10M_b$ 로 가정하였다. 여기서 M_b 는 납고무받침이 부담하는 상판무게이다. 그리고 교대와 주탑에 설치된 납고무받침은 소성강성비가 1.0 되도록 가정하였다 (교대-상판, 교각-상판 연결부에 같은 물성치의 납고무받침이 설치됨). 설계된 납고무 받침의 물성치는 Park 등⁽³⁾의 논문에서 제시되어 있다.

능동제어 장치로는 벤치마크 문제⁽⁴⁾에서 사용된 24개의 HA를 사용하였다. 8개는 두 번째 교각과 상판사이에, 8개는 세 번째 교각과 상판사이에, 4개는 첫 번째 교대와 상판사이에, 4개는 네 번째 교각과 상판사이에 각각 설치하였다. HA 하나는 1000kN의 용량을 가지고 있으며 동적거동은 무시하여 이상적인 거동을 한다고 가정하였다.

센서로는 5개의 가속도계와 4개의 변위계가 사용되었다. 4개의 가속도계는 주탑 꼭대기 부분에 설치되었고, 1개는 상판 가운데에 설치되었다. 2개의 변위계는 두 번째 교각과 상판 사이에 설치되었으며, 2개는 세 번째 교각과 상판 사이에 설치되었다. 모든 센서는 교축방향의 응답을 측정하고 동적거동은 무시하여 이상적인 센서로 생각하였다⁽⁴⁾.

2. 2. 제어 알고리즘

본 연구에서는 HA의 적절한 제어력을 계산하기 위해 LQG 제어 알고리즘을 사용하였다. LQG 제어 알고리즘은 응답가중행렬에 따라 제어성능이 달라지게 된다. 따라서 최대응답 접근방법⁽³⁾을 사용하여 최적 응답가중행렬을 결정하였다. 복합제어 시스템에서 능동제어력은 전체적인 제어성능을 향상시킬 수 있지만 작은 구조물의 응답에 가해지는 불필요한 능동제어력이나 실제 구조물에 적용시 수치모델과의 차이 때문에 발생하는 비정상적인 능동제어력은 제어기의 강인성에 문제를 일으킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 제어기의 강인성을 증가시키기 위해 납고무반침의 응답에 따라 계산된 제어력을 가해주는 bang-bang 형태(on-off 형태)의 알고리즘을 결합하였다. 이러한 bang-bang 형태의 알고리즘은 다음식과 같다.

$$f_{HA,i} = \begin{cases} (f_{HA,i})_c, & V_{LRB,i} \geq 0.03 \text{ m/s}^2 \text{ or } D_{LRB,i} \geq 0.005 \text{ m} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

여기서 $f_{HA,i}$ 는 i 번째 HA에 의해 구조물에 가해지는 실제 제어력, $(f_{HA,i})_c$ 는 LQG 제어 알고리즘을 통해 계산된 i 번째 HA의 제어력, $V_{LRB,i}$ 와 $D_{LRB,i}$ 는 각각 i 번째 납고무반침의 상대속도와 상대변위이다. HA의 작동조건($V_{LRB,i} \geq 0.03 \text{ m/s}^2$ or $D_{LRB,i} \geq 0.005 \text{ m}$)는 상세한 민감도 해석을 통해 결정되었다.

3. 수치예제

3. 1. 교량모델

본 연구에서 고려된 교량 모델은 사장교의 제어기법을 개발하기 위해 제시된 벤치마크 문제에서 고려한 Bill Emerson 교를 사용하였다. 이 교량은 2개의 주탑, 128개의 케이블 그리고 일리노이 진입로 부분의 12개의 추가적인 교각으로 구성되었다. 일리노이 진입로 부분은 사장교의 동적거동에 미치는 영향이 미비하기 때문에 이 벤치마크 문제에는 포함되어 있지 않다. Bill Emerson 교의 개략도는 그림 1과 같다.

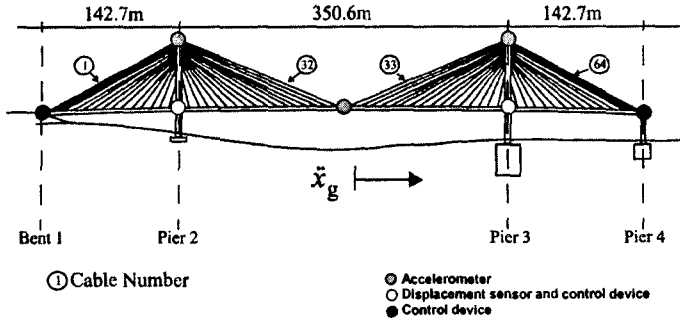


그림 1. Bill Emerson 교의 개략도 및 제어장치와 센서 위치

사장교의 상세도면에 기초해 Dyke 등은 교량의 복잡한 거동을 나타낼 수 있는 3차원 선형모델을 개발하였다⁽⁴⁾. 교량이 기반암에 건설되었다고 가정했기 때문에 지반-구조물 상호작용은 무시하였으며 구조물의 감쇠행렬은 교량을 설계할 때와 같은 가정사항인 3%의 모달감쇠(modal damping)를 각 모드(mode)에 적용하여 구성하였다. 원 설계에서는 상판과 주탑의 연결부분에 6.67 MN의 용량을 가지는 16개의 충격전달장치(shock transmission device)가 설치되었다. 이렇게 구성된 평가모델의 처음 10개의 고유주파수는 0.2899, 0.3699, 0.4683, 0.5158, 0.5812, 0.6490, 0.6687, 0.6970, 0.7102, 0.7203 Hz 이다. 이와 반대로 상판과 주탑 사이에 제어장치를 설치하기 위해 상판과 주탑을 분리한 두 번째 평가모델의 처음 10개의 고유주파수는 0.1618, 0.2666, 0.3723, 0.4545, 0.5015, 0.5650, 0.6187, 0.6486, 0.6965, 0.7094 Hz 이다.

벤치마크 문제에서는 위와 같은 평가모델 뿐만 아니라 각 제어방법의 성능을 평가하기 위한 18개의 평가기준이 제시되었다⁽⁴⁾. 처음 6개의 평가기준은 제어기법의 성능을 고려하기 위한 교량의 최대응답에 관한 것이며, 두 번째 5개의 평가기준은 전체 해석시간에 대한 평균응답(normed response)에 관한 것이다. 마지막 7개의 평가기준은 제어기 자체에 대한 제약조건에 관한 것이다. 좀더 자세한 평가기준은 Dyke 등의 논문⁽⁴⁾에 제시되어 있다.

3. 2. 수치해석 결과

3. 2. 1. 제어성능

그림 2는 교각 2에서의 제어하지 않은 경우와 복합제어된 밀면전단력을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 복합제어된 경우 제어하지 않은 경우보다 54% ~77% 까지 밀면전단력이 감소하는 것을 알 수 있다. 응답의 주파수 특성은 3개의 지진에서 유사하게 나타난다. 즉, 제어된 응답은 20 rad/sec 이하의 저주파에서 제어하지 않은 응답보다 작은 크기를 나타냈으며 20 rad/sec ~ 100 rad/sec 의 응답 크기는 제어하지 않은 경우에 비해 현저히 감소하였다 (그림 2의 원으로 표시된 부분).

그리고 100 rad/sec 이상의 고주파에서는 응답의 크기가 비슷하게 나왔다.

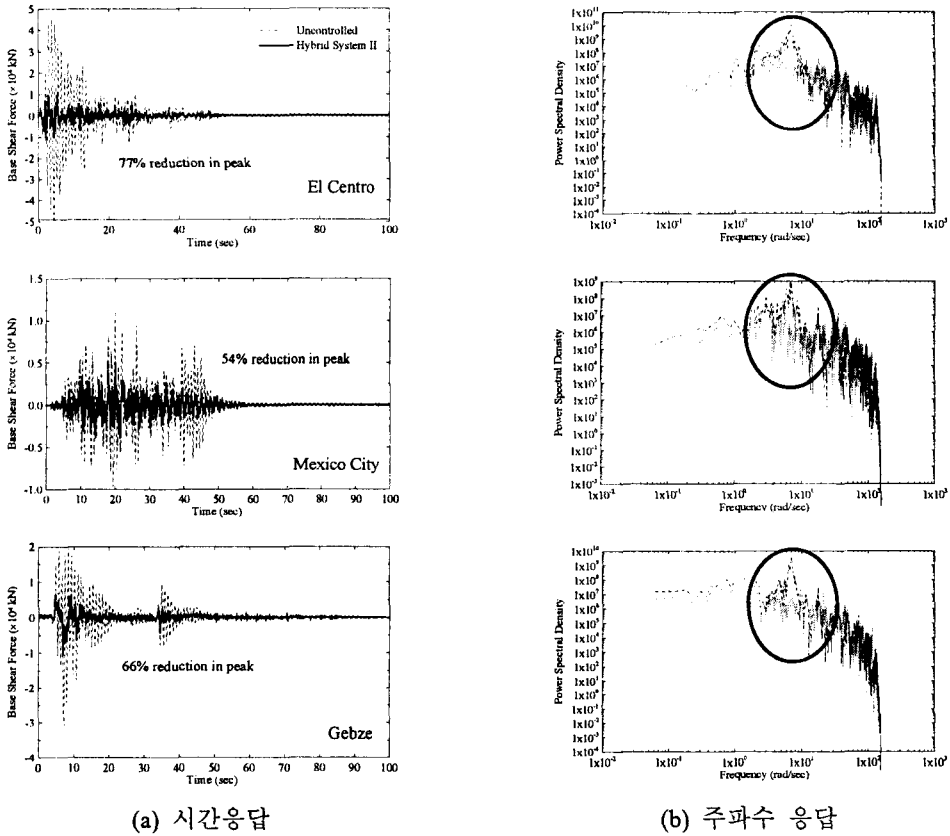


그림 2. 제어하지 않은 경우와 복합제어 된 교각 2에서의 밀면전단력

표 1은 3개의 지진에 대해서 최대 평가기준을 나타낸 것이다. 표에서 He 등(2001)으로 나타낸 것은 He 등⁽⁵⁾이 제안한 점성감쇠기와 가변반응동감성감쇠기(RSASD: Resetting Semi-Active Stiffness Damper)를 결합한 것이다. 복합제어 시스템 I 은 일반적인 복합제어 시스템으로서 LQG 제어 알고리즘만을 사용한 것이고 복합제어 시스템 II 는 추가적으로 bang-bang 형태의 제어 알고리즘을 사용한 것이다. 표에서 보듯이 복합제어 시스템의 전체적인 제어성능은 수동제어 시스템에 비해 월등히 뛰어나며 능동제어 시스템이나 He 등이 제안한 시스템에 비해 좀더 뛰어난 것으로 나타났다. 또한 복합제어 시스템 I 과 II 의 제어성능은 큰 차이를 보이지 않았다. 남고무받침만을 설치한 경우 상판변위가 다른 제어 시스템에 비해 크게 발생하지만 3개의 지진에서 모두 허용변위(30cm)⁽⁶⁾ 안에 있으며 고려된 모든 제어 시스템에서 케이블의 인장력은 허용범위⁽⁴⁾내에 존재한다.

3. 2. 2. 제어기의 강인성

제안된 복합제어 시스템의 실제 적용 가능성을 조사하기 위해 구조물의 강성행렬에 $\pm 7\%$ 의 교란을 적용하여 강인성을 검증하였다. 표 2는 El Centro 지진에서 평가기준의 최대 변화율을 나타낸 것이다.

표에서 보듯이 복합제어 시스템에서는 수동제어 장치의 영향으로 불안정한 결과를 나타내지 않는다. 그리고 강인제어 알고리즘의 일종인 μ -합성법을 사용한 능동제어 시스템의 경우보다 29%(J_{10}) ~ 88%(J_6) 까지 변화율이 감소하였다. LQG 제어 알고리즘을 사용한 능동제어 시스템의 경우 평균응답의 변화량이 상당히 크게 나타나며, 이러한 결과는 구조물이 제어를 설계할때와 변화된 강성을 가지게 되면 제어기의 안정성에 문제가 발생할 수도 있다는 사실을 나타내는 것이다.

그림 3은 7% 교란된 강성행렬에서 두 가지 복합제어 시스템으로 제어된 교각 2에서의 밀면전단력을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 두 가지 복합제어 시스템 모두 제어된 응답의 최대치는 비슷하다. 하지만 LQG 제어 알고리즘만을 사용한 복합제어 시스템의 경우 30 초 이후 전단력이 진동하면서 커지게 된다. 이 주파수는 그림에서 보듯이 22 rad/sec 이다. 이러한 활성화된 모드에 의해 구조물이 불안정하게 될 수 있다. 하지만 bang-bang 형태의 제어 알고리즘을 결합한 복합제어 시스템의 경우 이러한 현상은 나타나지 않는다. 따라서 bang-bang 형태의 제어 알고리즘을 결합한 복합제어 시스템의 강인성이 뛰어난 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 구조물에 전달되는 지진하중을 줄이기 위한 수동제어 시스템과 상관변위와 같은 교량의 응답을 추가적으로 감소시키기 위한 능동제어 시스템으로 구성된 복합제어 기법을 사장교의 벤치마크 문제에 적용하고 그 효율성을 알아 보았다. 제안된 제어기법은 수동제어 부분을 위해 일반적으로 사용되는 납고무받침을 사용하였으며 능동제어 부분은 이상적인 HA를 사용하였다. 납고무받침의 비선형 거동을 묘사하기 위해 *Bouc-Wen* 모델을 사용하였으며 LQG 제어 알고리즘과 bang-bang 형태의 제어 알고리즘을 결합하여 사용하였다. 수치해석 결과 제안된 복합제어 시스템은 수동제어 시스템에 비해 Mexico City 지진에서의 평균 케이블 인장력 변화(J_{11})를 제외하고 구조물의 응답이 6%~56% 까지 감소하였다. 그리고 $\pm 7\%$ 교란된 강성행렬에 대해 μ -합성법을 사용한 능동제어 시스템에 비해 26% ~86% 까지 평가기준 변화율이 감소하였다. 이러한 강인성은 수동제어 장치와 bang-bang 형태의 제어 알고리즘 때문이다. 따라서 제안된 제어기법은 지진하중을 받는 사장교의 제어에 매우 효과적이다.

감사의 글

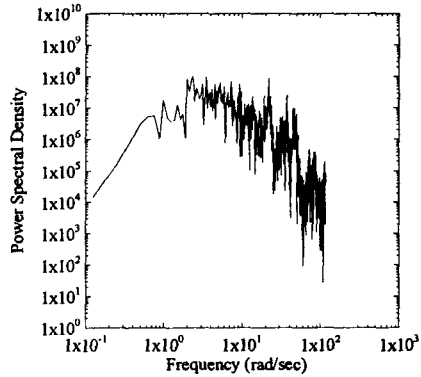
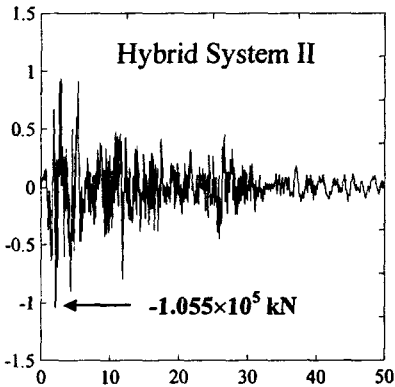
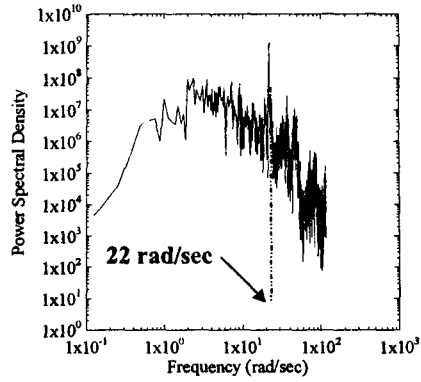
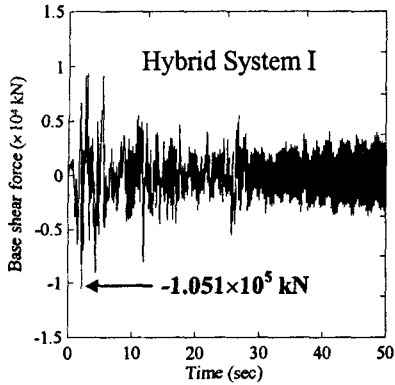
본 연구는 국가지정연구실(과제번호: 2000-N-NL-01-C-251)과 스마트 사회기반시설 연구센터의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

표 1.3 개의 지진에 대한 최대 평가기준

평가기준	수동제어 시스템	능동제어 시스템	He 등 (2001) ⁽⁵⁾	복합제어 시스템 I	복합제어 시스템 II
J ₁ - 최대 밀면전단력	0.5459	0.4898	0.4856	0.4841	0.5125
J ₂ - 최대 상판높이의 전단력	1.4616	1.1706	1.3536	0.9476	0.9510
J ₃ - 최대 전도모멘트	0.6188	0.4562	0.5539	0.4444	0.4439
J ₄ - 최대 상판높이의 모멘트	1.2656	0.8803	1.2199	0.6750	0.6737
J ₅ - 최대 케이블 인장력 변화	0.2077	0.1469	0.2176	0.1468	0.1479
J ₆ - 최대 상판변위	3.8289	1.8079	2.8227	1.6702	1.6787
J ₇ - 평균 밀면전단력	0.4211	0.3820	0.4083	0.3744	0.3824
J ₈ - 평균 상판높이의 전단력	1.5502	0.9737	1.4231	0.9261	0.9366
J ₉ - 평균 전도모멘트	0.4815	0.3591	0.4588	0.3345	0.3435
J ₁₀ - 평균 상판높이의 전단력	1.4429	0.7659	1.5085	0.7806	0.8196
J ₁₁ - 평균 케이블 인장력 변화	2.2327e-2	1.6221e-2	0.0262	1.8192e-2	1.7181e-2
J ₁₂ - 최대 제어력	2.1611e-3	1.9608e-3	0.0125	LRB+HA: 2.6427e-3 LRB: 1.2278e-3 HA: 1.9608e-3	LRB+HA: 2.6387e-3 LRB: 1.2316e-3 HA: 1.9608e-3
J ₁₃ - 최대 stroke	2.0993	0.9912	-	0.9157	0.9204
J ₁₄ - 최대 전력	-	9.3308e-3	-	9.0989e-3	6.7118e-3
J ₁₅ - 최대 총전력	-	8.7994e-4	-	1.1584e-3	8.5449e-4
J ₁₆ - 제어장치 개수	24	24	-	LRB+HA: 24+24	LRB+HA: 24+24
J ₁₇ - 센서 개수	-	9	-	9	9
J ₁₈ - 제일 알고리즘에 사용된 상태(state) 개수	-	30	-	30	30

표 2. El Centro 지진에서 평가기준의 최대변화율(% , 50 초 수치해석 결과)

평가기준 Criterion	Turan (2001) ⁽⁶⁾	능동제어 시스템	복합제어 시스템 I	복합제어 시스템 II
J ₁ - 최대 밀면전단력	36.9	36.9	9.2	9.1
J ₂ - 최대 상판높이의 전단력	52.0	68.0	22.4	21.8
J ₃ - 최대 전도모멘트	22.5	50.1	6.4	6.2
J ₄ - 최대 상판높이의 모멘트	31.0	27.3	5.3	5.1
J ₅ - 최대 케이블 인장력 변화	9.2	7.0	5.5	5.6
J ₆ - 최대 상판변위	19.0	16.3	2.4	2.3
J ₇ - 평균 밀면전단력	47.4	196.4	15.3	7.2
J ₈ - 평균 상판높이의 전단력	35.3	335.2	35.2	5.3
J ₉ - 평균 전도모멘트	28.5	138.1	8.5	7.4
J ₁₀ - 평균 상판높이의 전단력	18.7	84.5	15.1	13.3
J ₁₁ - 평균 케이블 인장력 변화	31.3	71.0	15.2	17.1



(a) 시간응답

(b) 주파수 응답

그림 3.7% 교란된 강성행렬에서의 교각 2의 밀면전단력 (El Centro 지진)

참고문헌

1. Spencer, Jr., B. F. and Sain, M. K., "Controlling buildings: A new frontier in feedback," *IEEE Control System Magazine*, Vol. 17, No. 6, 1997, pp. 19-35.
2. Ali, H. M., and Abdel-Ghaffar, A. M., "Seismic passive control of cable-stayed bridges," *Shock and Vibration*, Vol. 2, No. 4, 1995, pp. 259-272.
3. Park, K. S., Jung, H. J., and Lee, I. W., "Hybrid control strategy for seismic protection of a benchmark cable-stayed bridge," *Engineering Structures*, Vol. 25, No. 4, 2003, pp. 405-417.
4. Dyke, S. J., Turan, G., Caicedo, J. M., Bergman, L. A., and Hague, S., "Benchmark control problem for seismic response of cable-stayed bridges," <http://wussel.cive.wustl.edu/quake/>, 2002.
5. He, W. L., Agrawal, A. K., and Mahmoud, K., "Control of seismically excited cable-stayed bridge using resetting semiactive stiffness dampers," *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 6, No. 6, 2001, pp. 376-384.
6. Turan, G., "Active control of a cable-stayed bridge against earthquake excitations," Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2001.