

복합제어를 이용한 사장교의 지진응답 제어 기법

Control Strategy for Seismic Responses of a Cable-Stayed Bridge Using a Hybrid Control

박규식* · 정형조** · 김운학*** · 이인원****

Park, Kyu-Sik · Jung, Hyung-Jo · Kim, Woon-Hak · Lee, In-Won

1. 서 론

사장교는 매우 유연한 구조물이기 때문에 새롭고, 특이하고, 도전적인 진동제어 문제이다. 수동, 능동, 반 능동, 또는 이들을 조합하는 제어기법은 사장교의 진동제어에 효과적으로 사용될 수 있다. 본 연구에서는 Dyke 등이 개발한 첫 번째 벤치마크(benchmark) 사장교에 대한 복합제어 기법의 효용성을 조사하였다.

2. 벤치마크 문제

본 연구에서 고려된 사장교는 그림 1과 같이 2개의 주탑, 128개의 케이블(cable), 그리고 일리노이(Illinois) 진입로 방향의 12개의 추가적인 교각으로 구성되어 있다. 일리노이 진입로 부분은 사장교의 동적거동에 미치는 영향이 미비하기 때문에 이 벤치마크 문제에서는 포함되어 있지 않다. Dyke 등은 전체 규모의 거동을 효과적으로 나타낼 수 있는 선형 3차원 평가모델(evaluation model)을 개발하였다. 이때 사용된 강성행렬은 사 하중에 의한 교량의 변형 상태에서의 비선형 정적 해석을 통해 결정되었다. 교량이 기반암에 건설되었다고 가정했기 때문에 지반-구조물 상호작용은 무시하였다. 정적응축을 수행해 전체 교량모델을 419개의 자유도를 가지는 축소차수 모델을 구성하였다. 감쇠행렬은 교량을 설계할때와 같은 가정사항인 3%의 모달(modal)감쇠를 각 모드(mode)에 적용하여 구성하였다.

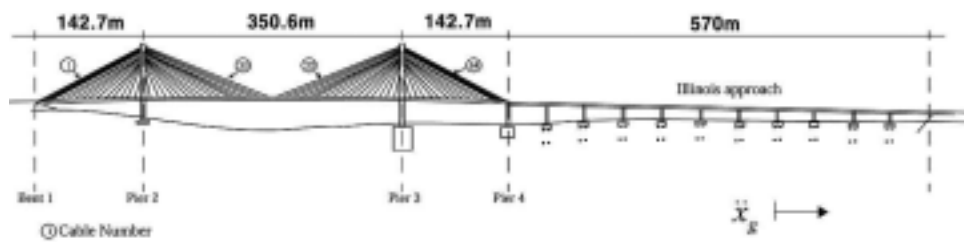


그림 1. Gape Girardeau 교의 개략도(Dyke 등, 2000)

각 제어방법의 성능을 평가하기 위한 18개의 평가기준(evaluation criteria)이 벤치마크 논문에 제시되어 있다. 처음 6개의 평가기준은 제어기법의 성능을 고려하기 위한 교량의 최대응답에 관한 것이며, 두 번째 5개의 평가기준은 전체해석시간에 대한 평균응답에 관한 것이다. 마지막 7개의 평가기준은 제어기 자체에 대한 제약조건에 관한 것이다. 평가기준에 대한 자세한 내용은 Dyke 등(2000)의 논문에 제시되어 있다.

* 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 · 공학석사 · 042-869-3658(E-mail:kyusik@kaist.ac.kr)
** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연구조교수 · 공학박사 · 042-869-5658(E-mail:hjung@mail.kaist.ac.kr)
*** 정희원 · 한경대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · 031-670-5144(E-mail:whkim@hnu.hankyong.ac.kr)
**** 정희원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 · 공학박사 · 042-869-3618(E-mail:iwlee@kaist.ac.kr)

3. 복합제어 기법

3.1 제어장치

3.1.1 수동제어 장치

본 연구에서는 일반적으로 많이 사용되고 있는 납고무받침을 수동제어 장치로 사용하였다. 납고무받침은 추천되는 설계방법(Ali 와 Abdel-Ghaffar, 1995)을 통해 설계되었으며, 그 결과 교대(교각)와 상판사이에 6개씩 총 24개의 납고무받침이 사용되었다. 납고무받침의 물성치는 표 1과 같다. 이 납고무받침들은 기존에 네 번째 교각에 설치된 보 요소의 수평강성을 제거한 후 설치되었다. 납고무받침의 비선형거동을 묘사하기 위해 Wen(Wen, 1989)에 의해 제안된 *Bouc-Wen* 모델을 사용하였다.

표 1. 납고무받침의 물성치

물성치	물성치값
탄성강성, $k_e(\text{N/m})$	3.571×10^7
소성강성, $k_p(\text{N/m})$	3.139×10^6
항복변위, $D_y(\text{cm})$	0.765
납의 설계항복 전단력, $Q_d(\text{kg})$	2.540×10^4

3.1.2 능동제어 장치

본 연구에서는 능동제어 장치로 벤치마크 문제에서 사용한 총 24개의 가진기(hydraulic actuator)를 사용하였다. 총 24개의 가진기 중 8개는 두 번째 교각과 상판사이에, 8개는 세 번째 교각과 상판사이에, 4개는 첫 번째 교대와 상판사이에, 4개는 네 번째 교각과 상판사이에 각각 설치하였다. 가진기 하나는 1000 kN의 용량을 가지고 있다. 능동제어 기법에서는 능동제어 장치만을 설치하고 복합제어 기법에서는 납고무받침이 설치된 교량에 능동제어 기법에서 사용된 가진기를 추가적으로 설치하였다. 가진기의 동적거동은 무시하였으며 이상적인 거동을 한다고 가정하였다. 가진기에서 발생하는 제어력은 다음 식들로부터 구할 수 있다.

$$\mathbf{f} = \mathbf{K}_f \mathbf{u} = \mathbf{G}_{dev} \mathbf{D}_d \mathbf{u} = \begin{bmatrix} 2 \mathbf{I}_{2 \times 2} & 0 & 0 \\ 0 & 4 \mathbf{I}_{4 \times 4} & 0 \\ 0 & 0 & 2 \mathbf{I}_{2 \times 2} \end{bmatrix} \mathbf{D}_d \mathbf{u} \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_f = \mathbf{D}_d \mathbf{u} = D_d \mathbf{I}_{8 \times 8} \mathbf{u} \quad (2)$$

여기서 \mathbf{f} 는 구조물에 작용하는 제어력, \mathbf{y}_f 는 제어장치 모델의 연속적인 제어력 벡터, $D_d=100$ kN/V는 제어장치 이득(gain), 그리고 \mathbf{K}_f 는 원하는 제어력과 볼트(volt)사이의 이득 행렬이다.

구조물의 응답을 측정하기 위해 5개의 가속도계와 4개의 변위계가 사용되었다. 4개의 가속도계는 주탑 꼭대기에 설치되었고, 1개는 상판 가운데에 설치되었다. 2개의 변위계는 두 번째 교각과 상판사이에 설치 되었으며, 2개는 세 번째 교각과 상판 사이에 설치되었다. 모든 센서는 교축방향의 응답을 측정하고 동적거동은 무시하여 이상적인 센서로 가정하였다(Dyke 등, 2000).

3.2 제어설계모델

제어기 설계를 위해서 평가모델에 기초하여 30개의 상태(state)를 가지는 축소차수 모델을 구성하였다. 이 모델은 balanced realization 과 상대적으로 중요도가 작은 controllability grammian 과 observability grammian 을 가진 상태를 응축하여 구성하였다. 최종적인 구조물의 상태공간 방정식은 다음 식들과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}}_d = \mathbf{A}_d \mathbf{x}_d + \mathbf{B}_d \mathbf{u} + \mathbf{E}_d \ddot{\mathbf{x}}_g \quad (3)$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{C}^z_d \mathbf{x}_d + \mathbf{D}^z_d \mathbf{u} + \mathbf{F}^z_d \ddot{\mathbf{x}}_g \quad (4)$$

$$\mathbf{y}_s = \mathbf{D}_s (\mathbf{C}^y_d \mathbf{x}_d + \mathbf{D}^y_d \mathbf{u} + \mathbf{F}^y_d \ddot{\mathbf{x}}_g) + \mathbf{v} \quad (5)$$

여기서 \mathbf{x}_d 는 설계 상태 벡터, \mathbf{A}_d , \mathbf{B}_d , \mathbf{E}_d 는 설계 시스템 행렬, $\ddot{\mathbf{x}}_g$ 는 지반 가속도, \mathbf{u} 는 입력 제어 신호, 그리고 \mathbf{z} 는 평가출력값을 포함한 제어된 출력, \mathbf{C}^z_d , \mathbf{D}^z_d , \mathbf{F}^z_d 는 설계 모델에서 제어된 출력 시스템 행렬, \mathbf{C}^y_d , \mathbf{D}^y_d , \mathbf{F}^y_d 는 설계 모델에서 측정된 출력 시스템 행렬이다.

3.3 제어 알고리즘

본 연구에서는 능동제어 기법과 복합제어 기법의 능동제어 부분을 위해 H_2/LQG 제어 알고리즘을 사용하였다. 지반 가속도는 stationary white noise로 가정하여 다음과 같은 가격함수(cost function)을 선택하였다.

$$J = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} E \left[\int_0^{\tau} (\mathbf{z}^T \mathbf{Q} \mathbf{z} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \right] \quad (6)$$

여기서 \mathbf{R} 은 8차의 단위행렬의 제어력가중 행렬, 그리고 \mathbf{Q} 는 응답가중 행렬이다. H_2/LQG 제어 알고리즘을 사용할 경우 제어성능은 응답가중 행렬에 많은 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 최대응답 접근방법(박규식 등, 2002)을 사용하여 최적 응답가중 행렬 \mathbf{Q} 를 결정하였다. 최대응답 접근방법을 통해서 결정된 최적 응답가중 행렬은 다음과 같다.

$$\mathbf{Q}_{om, dd} = \begin{bmatrix} q_{om} \mathbf{I}_{4 \times 4} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & q_{dd} \mathbf{I}_{4 \times 4} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 q_{om} 은 진도모멘트 가중변수, q_{dd} 는 상판변위 가중변수이다. 능동제어 기법에서는 $q_{om}=4 \times 10^{-9}$, $q_{dd}=1 \times 10^4$ 을 사용하였고, 복합제어 기법에서는 $q_{om}=5 \times 10^{-9}$, $q_{dd}=1 \times 10^3$ 을 사용하였다.

4. 수치예제

복합제어 기법의 효과를 검증하기 위해 El Centro, Mexico City, Gebze 3개의 역사지진에 대해 수치해석을 수행하였다. 표 2는 3개의 지진에 대해 평가항목의 최대값을 나타낸 것이다. 표에서 볼 수 있듯이 복합제어 기법은 수동제어 기법에 비해 구조물의 응답이 최소 10%에서 최대 57%까지 감소하였고, 능동제어 기법에 비해 최소 0.3%에서 최대 35%까지 감소하였다. 수동제어 기법의 경우 전체적으로 제어하지 않은 경우보다 응답이 감소하는 반면 상판변위가 상대적으로 증가하였다. 하지만 그림 2와 같이 고려된 3개의 지진에 대해 상판변위는 허용범위(30 cm)내에 있다. 또한 능동제어, 복합제어 기법 모두 3개의 지진에 대해 제어기 제약조건(최대힘: 1000 kN, 최대 stroke: 0.2 m, 최대 속도: 1 m/s)을 만족하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 사장교에 대한 벤치마크 문제를 이용하여 복합제어 기법의 효용성을 조사하였다. 복합제어 기법의 수동제어 부분에는 *Bouc-Wen* 모델을 사용한 납고무받침을 사용하였고, 능동제어 부분에는 H_2/LQG 제어 알고리즘으로 제어되는 이상적인 가진기를 사용하였다. 수치해석 결과 제안방법의 제어성능은 수동제어 기법에 비해 매우 뛰어나며, 능동제어 기법보다는 약간 좋은 제어 성능을 나타내었다. 또한 복합제어 기법은 수동제어 기법을 기반으로 하기 때문에 능동제어 기법에 비해 좀더 신뢰할 수 있다. 따라서 제안된 복합제어 기법은 지진하중을 받는 사장교의 제어에 매우 효과적으로 사용될 수 있다.

표 2. 3개의 지진에 대한 평가항목 최대값

평가기준	수동제어	능동제어	복합제어
J ₁ : 최대 밀면 전단력	0.5459	0.5071	0.4854
J ₂ : 최대 상판 높이의 전단력	1.4616	1.1576	0.9360
J ₃ : 최대 전도모멘트	0.6188	0.4485	0.4471
J ₄ : 최대 상판 높이의 모멘트	1.2656	0.8792	0.6719
J ₅ : 최대 케이블 인장력	0.2077	0.1474	0.1462
J ₆ : 최대 교대에서의 상판변위	3.8289	1.8023	1.6629
J ₇ : 평균 밀면 전단력	0.4211	0.3755	0.3723
J ₈ : 평균 상판 높이의 전단력	1.5502	0.9510	0.9169
J ₉ : 평균 전도모멘트	0.4815	0.3563	0.3336
J ₁₀ : 평균 상판 높이의 모멘트	1.4429	0.7618	0.7799
J ₁₁ : 평균 케이블 인장력	2.233e-2	1.618e-2	1.822e-2
J ₁₂ : 최대 제어력	2.161e-3	1.961e-3	1.961e-3
J ₁₃ : 최대 제어장치의 stroke	2.0993	0.9886	0.9118
J ₁₄ : 최대 전력(power)	-	9.331e-3	6.668e-3
J ₁₅ : 총전력	-	8.800e-4	8.489e-4
J ₁₆ : 제어장치 개수	24	24	24(24)
J ₁₇ : 센서 개수	-	9	9
J ₁₈ : $\dim(x^c_k)$	-	30	30

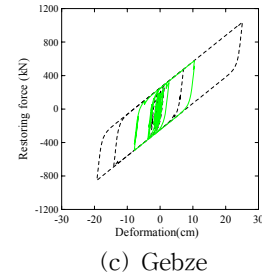
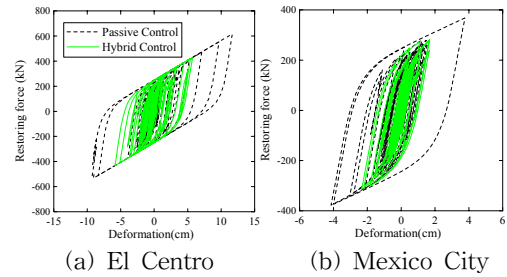


그림 2. 교각 2에서의 납고무받침의 복원력

감사의 글

본 연구는 2000년도 한국과학기술부의 국가지정연구실 지원(과제번호: 200-N-NL-01-C-251)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Dyke, S. J., Turan, G., Caicedo, J. M., Bergman, L. A., and Hague, S. (2000) Benchmark control problem for seismic response of cable-stayed bridges, <http://wusceel.cive.wustl.edu/quake/benchmark/capebench.htm>.
2. Ali, Hosam-Eddin M. and Abdel-Ghaffar, Ahmed M. (1995) Seismic passive control of cable-stayed bridges, *Shock and Vibration*, Vol. 2, No. 4, pp. 259-272.
3. Wen Y. K. (1989) Method for random vibration for inelastic structures, *Journal of applied mechanics division*, Vol. 42, No. 2, pp. 39-52.
4. 박규식, 정형조, 이종현, 이인원 (2002) 지진하중을 받는 벤치마크 사장교를 위한 복합제어 기법, *대한토목학회 논문집*, 제22권, 제3-A호, pp. 573-585.