강주탑의 비선형거동 특성을 고려한 케이블교량의 지진해석
Evaluation of Seimic Capacity of Cable-Stayed Bridges Considering Inelastic Behavior of Steel Pylons

배성한* 이경찬** 장승필*** 김익현****
Bae, Sung Han Lee, Kyoung Chan Chang, Sung Pil Kim, Ick Hyun

ABSTRACT

Inelastic model of Second Jindo Bridge is investigated to perform nonlinear dynamic analyses with various earthquake ground motions. The modal analysis is performed to obtain dynamic characteristics of the bridge and verify the model. It proves that the model has an appropriate dynamic characteristic and its natural frequency is relatively low. Four ground motions are chosen for time history dynamic analyses; El Centro, Kobe, Taft, and Mexico earthquake. Each ground motion multiplied by specified factors to investigate damages of the structure. The analyses prove that responses of the bridge depend on the duration time and the frequency characteristics of ground motion, not only peak acceleration. Static push-over analysis of steel pylon shows that the dynamic analysis over-estimates the seismic behavior of steel pylon definitely. Nonlinear spring hinge model is suggest to improve the shortage of the inelastic model could not deliberate local buckling damage. According to the time history analysis of nonlinear spring hinge model, it is proved that the inelastic beam element analysis overestimate the seismic capacity of steel pylon unquestionably with a large amount of errors.

1.서론

현재 장대교량 설계에서 주로 사용되고 있는 허용응력 설계법은 구조물이 설계 지진력에 대하여 탄성한계 내에서 머물도록 하고 있으나, 진보된 설계법인 하중-저항계수 설계법과 성능기초 설계법에서는 다단계 설계 지진하중에 대하여 소성변형을 허용하는 소요성능에 대해서도 설계 가능하도록 권장하고 있다. 또한, 주요 구조물일수록 설계지진력 이외에도 여러 가지 발생 가능한 지반 운동에 대하여 구조 시스템의 지진거동 특성을 파악하는 것도 매우 의미 있는 일이다.

지금까지의 장대교량의 해석은 전체 구조물의 기하비선형과 케이블 재료의 처짐 효과에 따른 비선형성 정도를 주로 고려하였으나 본 연구에서는 구조물의 재료비선형과 강주탑의 국부좌굴에 의한 비선형거동 특성

* 학생회원 서울대학교 지구환경시스템공학부, 석사
** 학생회원 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사수료
*** 정회원 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수
**** 정회원 울산대학교 건설환경공학부, 조교수

을 고려한 지진해석을 수행하였으며 주탑의 국부좌굴이 전체 교량시스템의 지진거동에 미치는 영향을 비교·분석하였다. 먼저, 탄소성 보요소 모델에 의한 비탄성 해석을 수행하였고, 지진응답으로서 강주탑 하단에 발생하는 휨 모멘트가 강주탑의 국부좌굴을 발생시키는지를 판요소에 의한 상세해석을 수행하여 확인하였다. 강주탑의 국부좌굴에 의한 지진거동 특성을 보다 정확하게 모사하기 위하여 비선형 스프링 모델을 도입하여 해석을 수행하였다. 해석결과 부재에 소성변형이 발생하기 이전에 강주탑의 국부좌굴이 발생하며 이러한 국부좌굴은 주탑의 응답변위뿐만 아니라 보강형의 응력 및 변위, 케이블의 장력 등 교량시스템의 주요 응답에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

2.비탄성해석(재료비선형고려)

21.해석모델

대상 교량인 제2진도대교로 세장한 A형 강주탑과 거더를 갖는 강사장교이다. 주탑과 거더는 3차원 공간 뼈대 보요소(B33)로, 케이블은 초기장력을 도입한 공간 트러스 요소(T3D2)를 사용하였다[1,2]. 이때 케이블에 도입된 초기 긴장력은 최적의 장력을 구한 기존 연구[3]의 결과로 얻은 초기 장력값을 사용하였다. 거더와 주탑을 연결한 탄성 받침은 비선형 스프링 요소(SPRING2)를 사용하여 모델링 하였다[1,2]. 그림 1는 모델링 형상과 주탑과 거더의 연결부 스프링이다.

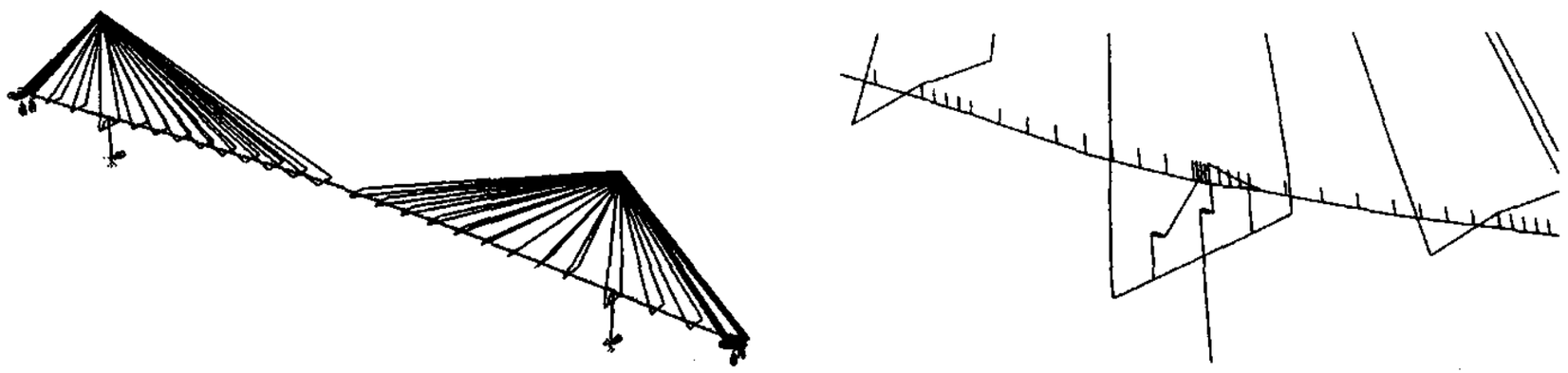

그림 1. 제2진도대교 3차원 모델 형상

강재 주탑의 비탄성 거동을 모사하기 위하여 Isotropic Hardening Model을 적용하였다. 이 모델은 전단면 소성 변형이 발생하고 그 방향이 일정할 때 사용할 수 있는 모델로서 일반적인 강재의 소성해석에 사용되는 모델이다[1]. 그림 2는 연구에서 사용된 응력-변형도 곡선을 나타낸다. 거더와 주탑을 수평방향으로 연결한 탄성 받침은 전체 교량의 내진성능에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 이 연구에는 이러한 탄성 받침의 손상을 고려하기 위하여 비선형 스프링 요소를 사용하여 모델링 하였다. 각 재료에 대한 물성치는 표1과 같다.

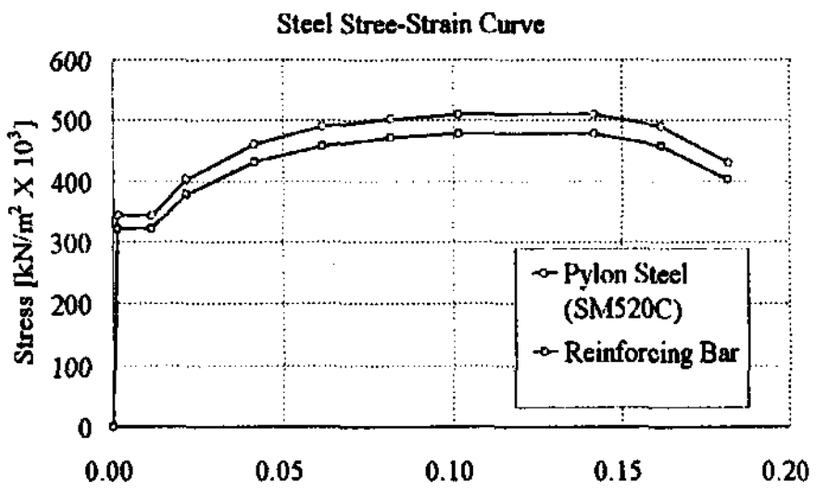

그림 2. 강재의 응력-변형도 곡선

표 1. 재료 성질

재료	탄성 계수	포아송비	재료 감쇠비	해석 모델
주탑 강재	205.8 kN/mm^2	0.3	2 %	Isotropic Hardening Model
탄성 받침	5854.8 kN/m	-	-	Nonlinear Spring

2.2 입력지반운동

비탄성 시간이력해석을 수행하기 위한 지진하중으로 1940년의 El Centro, 1952년의 Taft, 1985년의 Mexico, 그리고 1995년의 Kobe 지진파를 사용하였다. 이 각각의 지진파는 나름의 주파수 특성을 가지고 있기 때문에 이에 대한 영향을 확인해 보았다. 또한 각각의 지진의 가속도 크기를 증감하여 다양한 크기의 지진에 대하여 검토해 보았다. 각각 증감한 계수와 그때의 PGA는 그림 3에 도시하였다. 그림 4는 각 지진파의 FFT를 통한 주파수 특성을 연구 대상구조물의 주요 주파수 영역인 1Hz이하에서 정규화하여 나타내었다. 그림 4에서 Mexico와 Taft 지진의 주파수는 구조물의 1차모드의 주파수 영역에서 다른 지진파에 비하여 크게 나왔고, 이와 반대로 Kobe 지진에서는 비교적 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 구조물의 주요 주파수 영역을 넘어선 장주기 영역에서 큰 값을 보이는 Kobe, Tafe, El Centro 지진파에서는 장주기에 의한 손상이 구조물 전체 거동에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수가 있다.

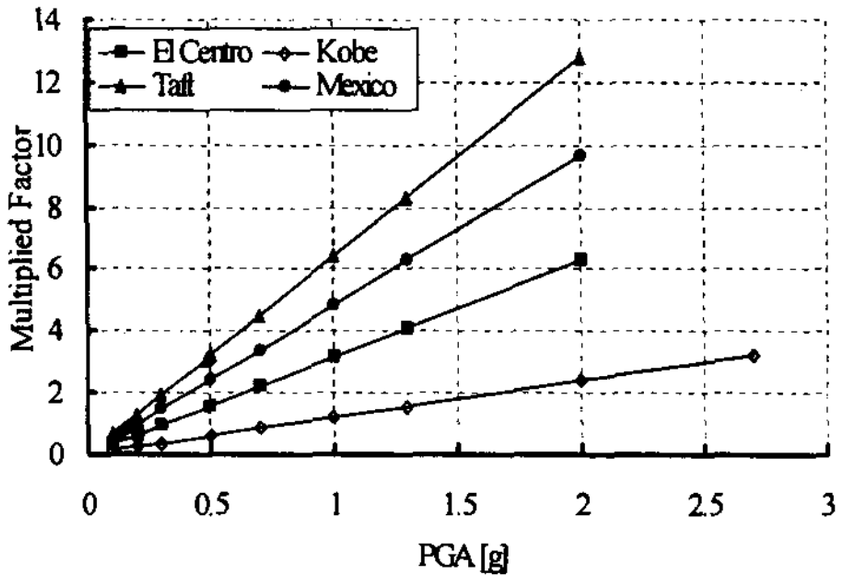

그림 3. 입력지반가속도와 증감계수

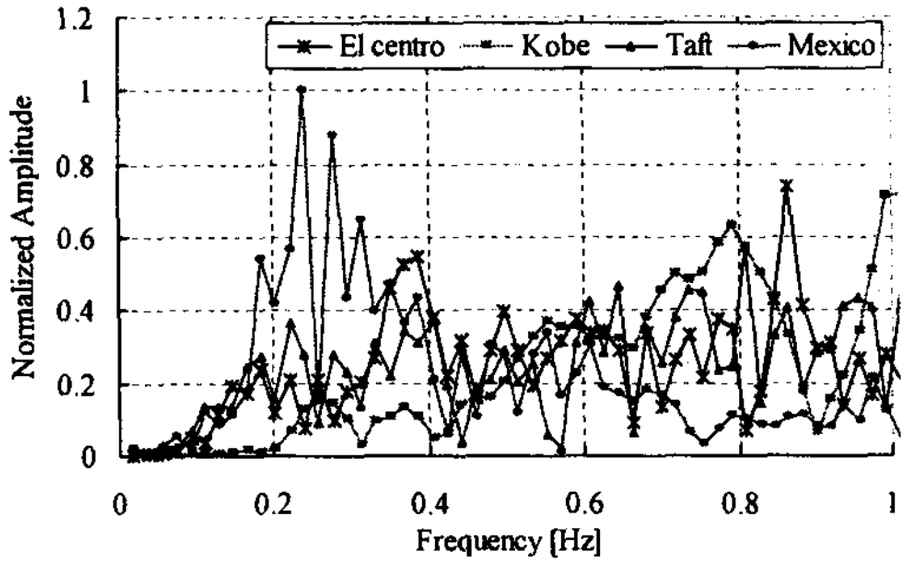

그림 4. 정규화한 FFT 스펙트럼

2.3 해석결과

위에서 언급한 입력 지진에 대하여 직접 적분법을 이용한 시간 이력 해석을 수행하였다. 가진 크기가 증가함에 따라 교량에 손상이 발생하는 이력을 살펴보았다. 손상으로 고려한 것은 주탑 상부 강재의 소성 거동 그리고 탄성 받침의 파손이다. 그림 5는 각 지반 운동에 대한 강주탑 하단에서의 최대단면모멘트를 나타낸다. 이때 강재주탑의 손상(재료비선형)은 88,290kN·m에서 발생하였으며, 그림4의 정규화된 FFT 스펙트럼의 특성과 같이 Kobe 지진의 경우는 PGA가 0.84g로 큰 지진 입력에서도 강재주탑의 손상이 없었으며, Mexico와 Taft 지진의 경우에는 작은 크기의 지진에서도 큰 응답을 보이며 강재 주탑에 손상을 주기 때문에 이러한 지반 운동에 대해서는 교량의 안전이 보장되지 않음을 보여주고 있다. 특히 Taft 지진파에서는 1.0g의 PGA에서 위험한 반응을 보이고 있음을 알 수 있다.

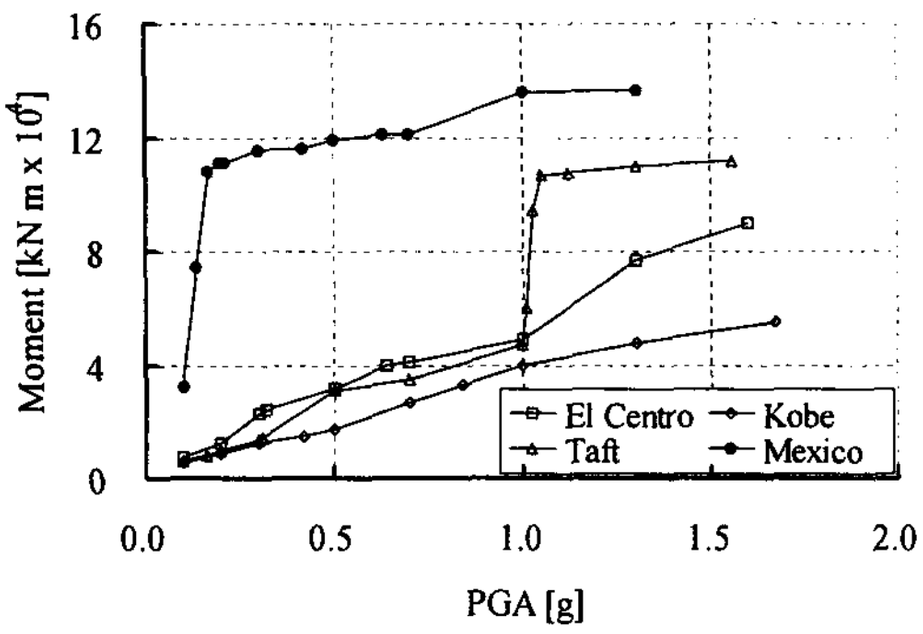

그림 5. 강주탑 하단에서 최대단면모멘트

3. 강재주탑상세해석

위에서 수행한 탄소성 보요소 해석에 의한 응답모멘트에 의해 강주탑에 국부 손상이 발생하는지 확인하기 위하여 상세 해석을 수행하였다. 해석은 판요소(S4R)를 사용하여 그림 6과 같이 상세모델링을 하고, 수직 하중으로 전체 교량의 1/4 (21872.05 kN)을 가한 상태에서 수평하중을 점차 증가시키는 RIKS해석 방법을 이용

한 정적해석을 수행하였다[1,2].

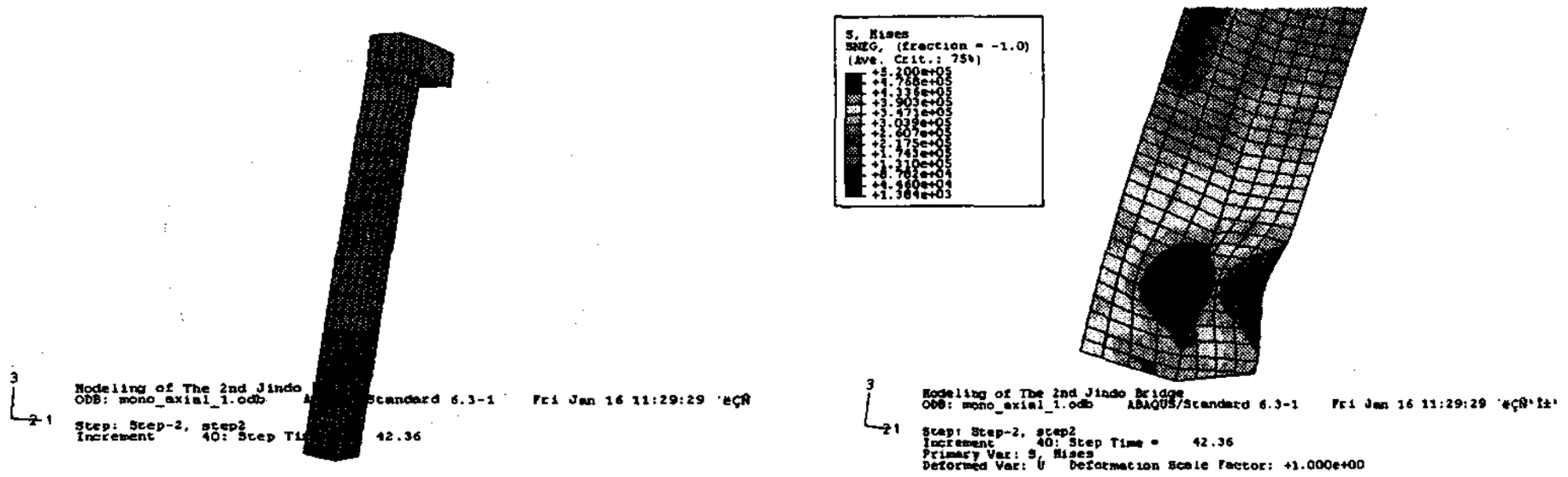

그림 6. 강재 주탑 하부의 상세 모델링과 변형 형상

그림 7은 수평력-변위의 관계곡선이다. 탄성거동 후 주탑 하부의 국부좌굴에 의하여 수평저항력이 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 국부 좌굴이 발생하는 최대 수평력은 590kN이다.

수평력에 의해 도입된 모멘트와 강주탑이 변형된 후 수직력에 의하여 도입된 2차적인 모멘트(그림8에서 2nd order)를 합하여 전체 모멘트를 도시하면 그림 8과 같다. 여기서 국부좌굴에 의해 주탑의 손상모멘트 약 25,880 kN·m이다. 탄소성 보요소 해석에서 재료의 비선형이 발생하는 모멘트는 약 88,200 kN·m이어서 강제 주탑의 국부좌굴이 재료의 비선형에 앞서 훨씬 빨리 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서, 이러한 주탑의 국부좌굴에 거동특성이 반영되지 않는다면 재료비선형을 고려한 비선형 해석을 수행하더라도 교량 전체시스템의 지진거동특성(교량의 내진성능)을 이해하기는 어렵다.

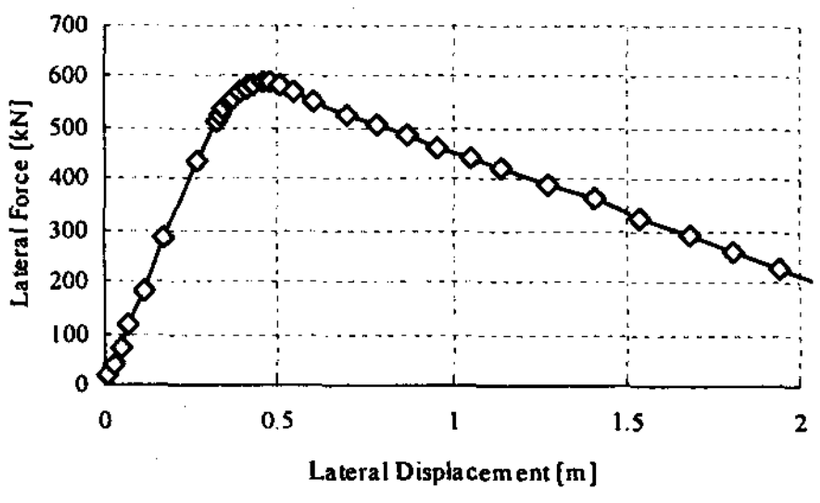

그림 7. 수평력 - 수평 변형

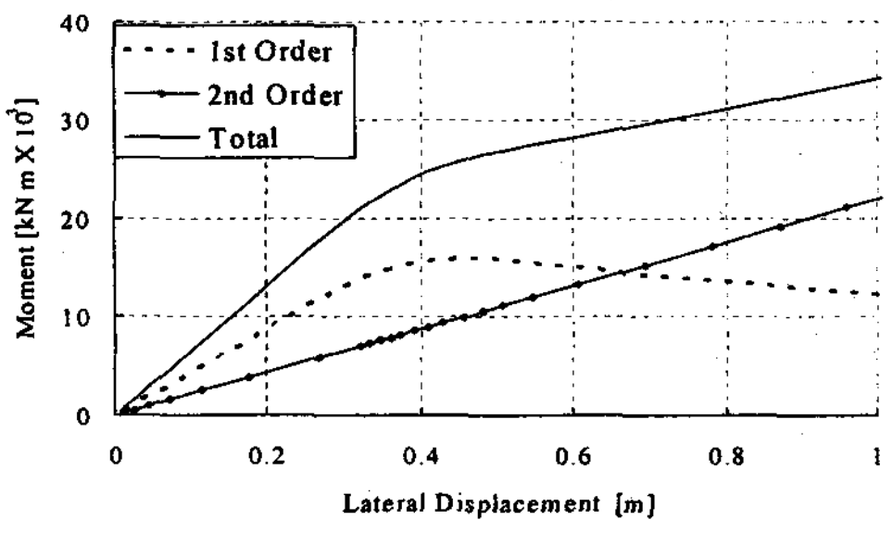

그림 8. 전체 반력 모멘트 - 수평 변형

4.비선형스프링모델

4.1해석모델

강주탑의 국부좌굴에 의한 거동특성을 고려하기 위하여 비선형 회전 스프링을 도입(그림 9 참조)하여 해석을 수행하였다. 그림 7의 강주탑의 수평력-수평변위 곡선에서 초기변위는 강주탑의 탄성변형에 의한 변위이고 국부좌굴 후에 발생하는 수평변위는 국부좌굴에 의한 단면의 소성회전으로 이상화할 수 있다. 따라서, 이러한 소성회전을 구현할 수 있는 그림 10과 같은 비선형 스프링모델을 도입하였다. 강주탑의 국부좌굴이 발생하는 모멘트인 25,880 kN·m의 응답모멘트가 발생하면 소성회전이 발생하게 된다. 현재 적용한 소성회전 스프링은 하중이 떨어지면(Unloading) 재하곡선을 따라 가는 탄성성질을 지니고 있어 잔류변위를 구현하지 못하고 있고, 국부좌굴 후의 강도가 저하(Strength degradation)도 구현되지 않아 교량시스템의 실제 거동을

모사하기에는 다소 불충분하지만 국부좌굴에 의한 교량시스템의 지진거동의 차이점은 분석 가능하다고 할 수 있다.

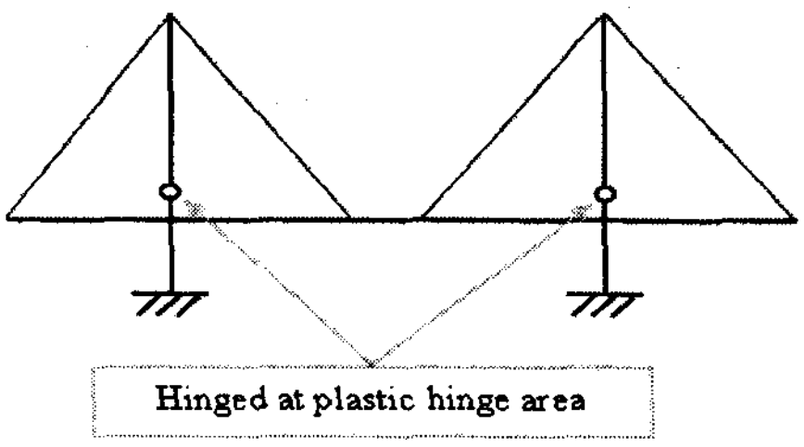

그림 9. 비선형 스프링 모델의 기본 개념

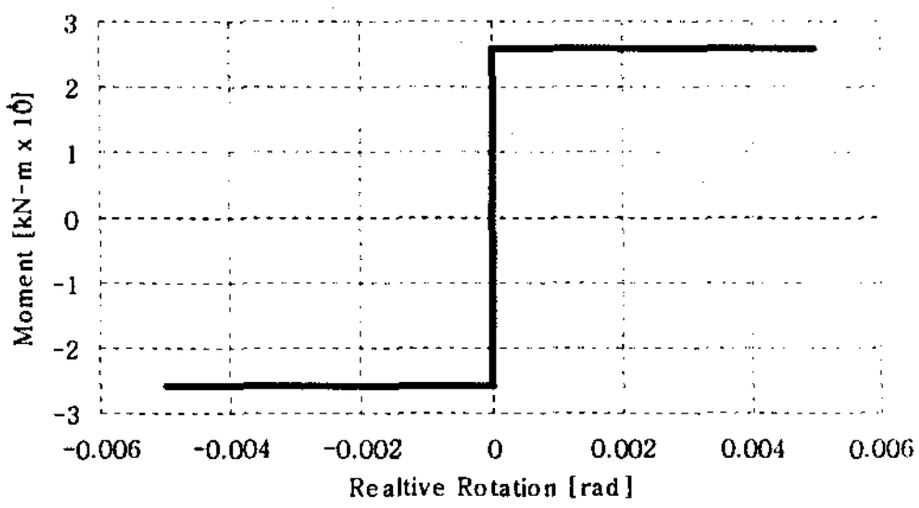

그림 10. 비선형 스프링 특성

4.2해석결과및비교

El Centro 지진의 최대가속도를 1.0g로 증가시켜 해석을 수행하였다. 비선형해석(재료비선형)에서의 주요응답과 비교하기 하기 위하여 강주탑 상하단에서의 응답변위, 강주탑 하단에서의 응답모멘트 및 부재력의 시간이력, 케이블의 장력 변화 및 보강형 중앙에서의 변위 응답을 비교하였다. 응답의 비교위치는 그림11과 같다. 그림12와 그림13은 강주탑의 변위특성을 보여준다. 강주탑 하단에서는 국부좌굴의 영향을 받지 않아 동일한 변위특성을 나타낸다. 그러나 강주탑 상단의 경우에는 큰 차이를 보여주고 있다. 이러한 큰 차이는 그림 14의 응답모멘트의 차이로부터 이해할 수 있다. 국부좌굴이 고려되지 않은 모델(w/o spring)에서는 초반부에 큰 휨모멘트가 발생하고는 그 이후에는 강주탑의 국부좌굴을 발생시키는 정도의 모멘트는 발생하고 있지 않다. 그러나 국부좌굴이 고려된 모델(w/ spring)에서는 일단 국부좌굴이 발생하여 수평변위가 발생하면 수직하중에 의한 부가모멘트가 추가적으로 크게 발생하여 재료비선형 해석에서와는 달리 응답변위가 감소하지 않고 점점 확대되는 특성을 보여 주고 있다.

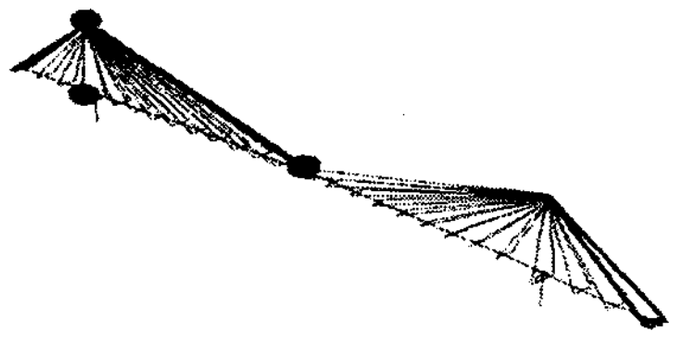

그림 11. 거동비교위치

그림 16와 그림17은 각각 내측 케이블의 장력 변화와 경간 중앙위치에서의 보강형의 응답변위를 나타낸 그림이다. 국부좌굴을 고려하는 경우 주탑에 큰 변위가 발생하여 여기에 연결되어 있는 케이블에도 큰 장력 변화가 있다. 이와 마찬가지로 케이블에 지지되고 있는 보강형도 변위가 증대하고 국부좌굴에 따라 진동주기도 증가하는 것을 알 수가 있다.

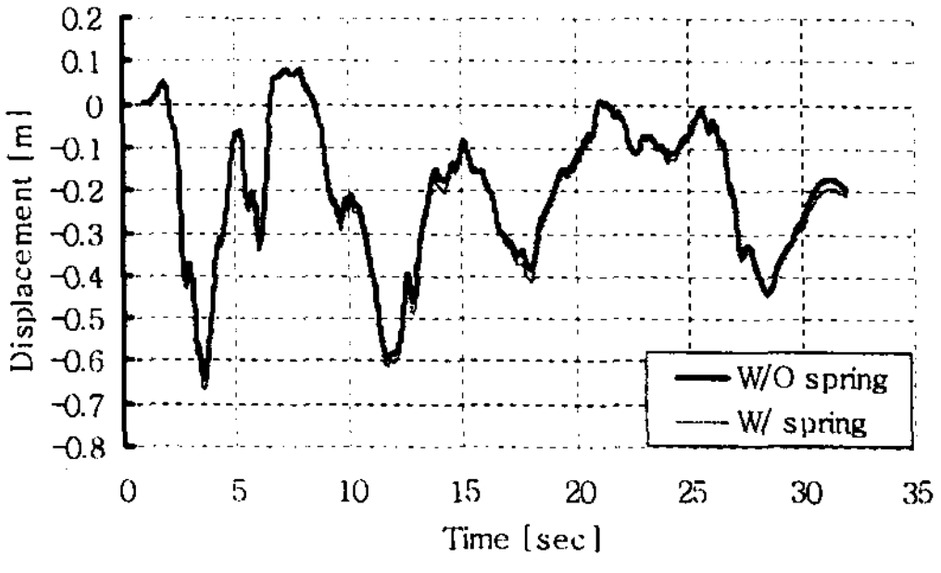

그림 12. 강주탑 하단에서 변위(m)

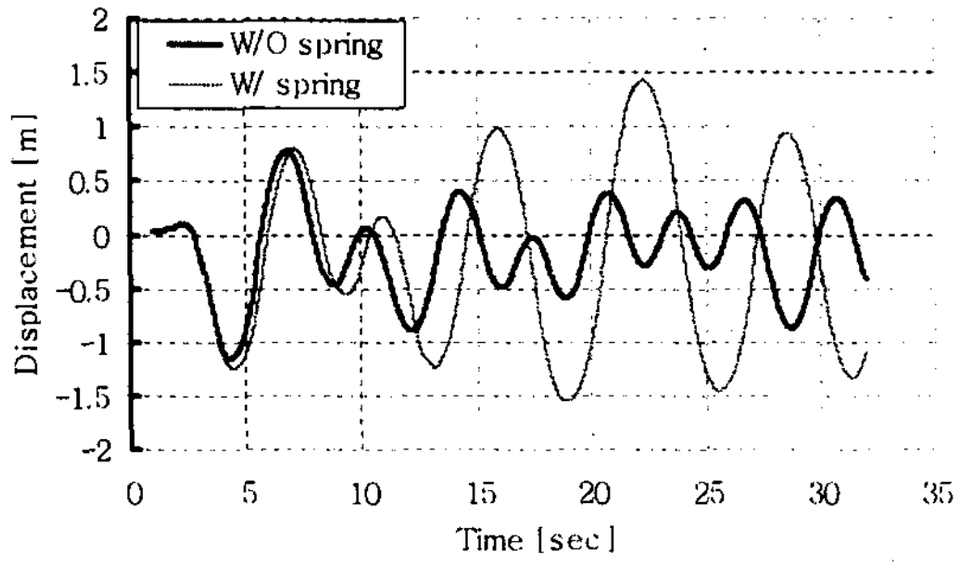

그림 13. 강주탑 상단에서 변위(m)

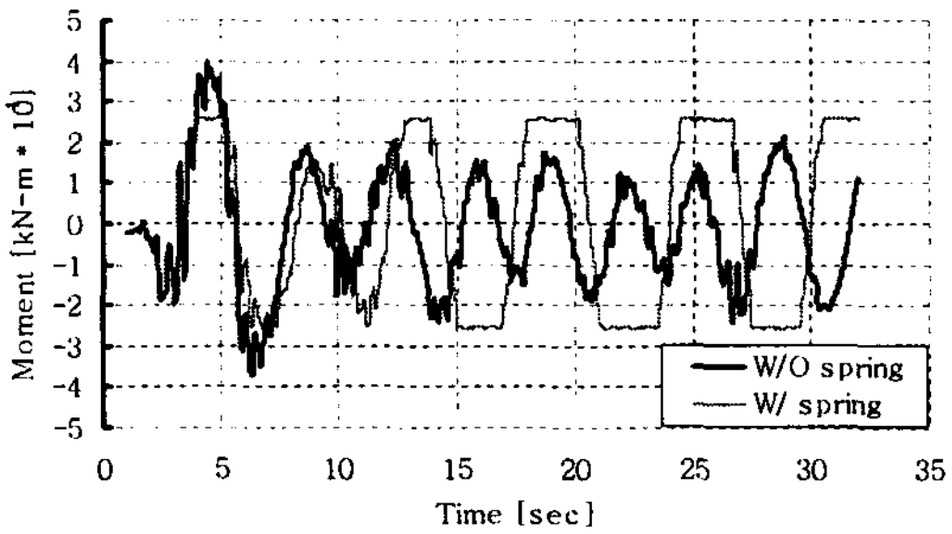

그림 14. 강주탑 하단에서 응답모멘트

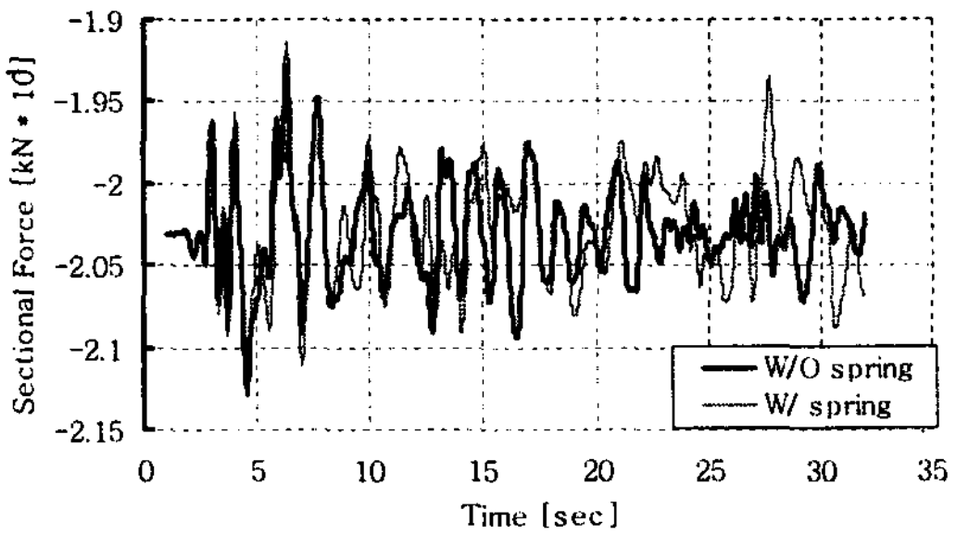

그림 15. 강주탑 하단에서 부재력

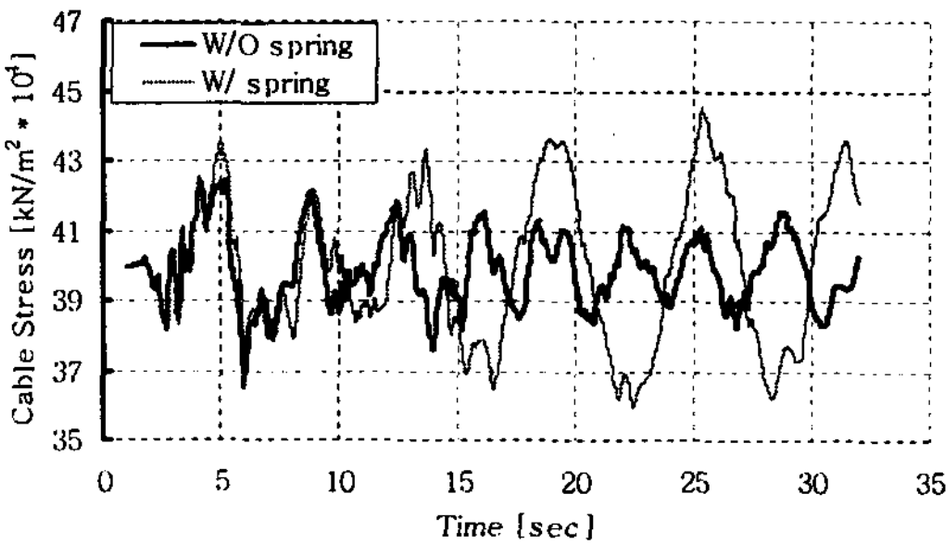

그림 16. 케이블 장력변화

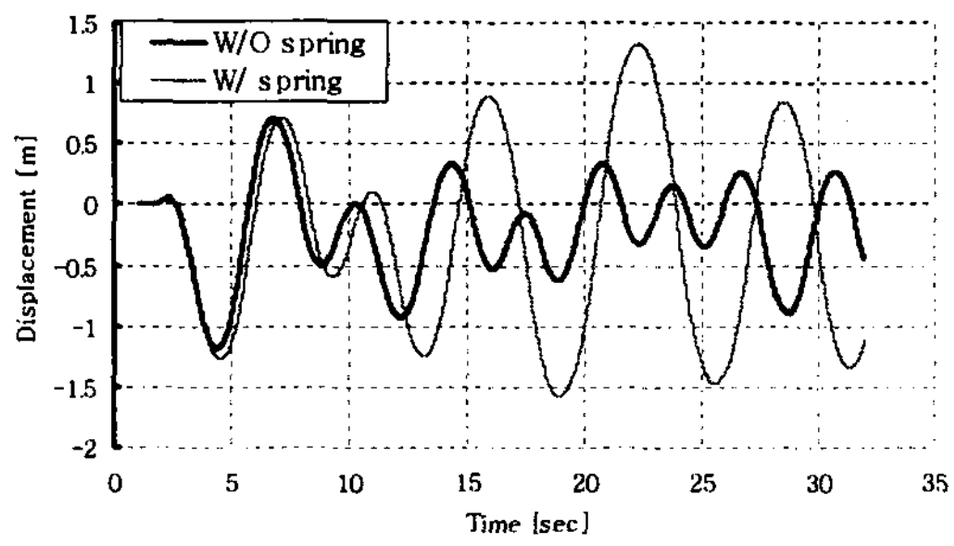

그림 17. 보강형 중앙에서 변위응답

5.결론

다양한 실제 지반운동에 대하여 재료의 비선형성을 고려한 시간이력해석을 수행하였다. 그 결과 사장교의 응답은 입력운동의 가속도 크기뿐만 아니라 주파수 특성과 교량 자체의 구조적 특성에 영향을 받는 것을 확인하였다. 즉 입력 가속도의 크기가 동일하더라도 지진파의 종류에 따라 교량의 손상 이력이 달라지는 것을 확인하였다. 한편, 이러한 탄소성 보요소 해석에서는 고려할 수 없는 주탑의 국부좌굴이 교량시스템의 지진거동에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 주탑에 대한 상세해석을 수행하여 국부좌굴 특성을 확인하고 이의 거동 특성을 대표할 수 있는 비선형 스프링 모델을 도입하여 지진해석을 수행하였다. 주탑의 변위 및 힘, 보강형의 변위, 케이블의 장력 등 교량의 주요 응답에 대한 두 해석결과에서 큰 차이를 나타내었다. 국부좌굴을 고려한 모델 해석에서는 국부좌굴과 함께 주탑의 상단 변위가 확대되어 케이블에서 큰 장력변화가 생기고 보강형에서도 응답변위가 커져 교량의 진동주기가 장주기화 되는 특성을 나타내었다. 따라서, 향후 성능에 기초한 내진설계에서는 이와 같이 주탑의 국부좌굴을 고려한 지진해석을 수행하여 지진거동 특성을 파악하고 목표 내진성능을 검토하는 것이 필요하다고 하겠다.

본 연구에서는 국부좌굴을 대표하는 비선형스프링의 거동특성이 단순화되어 있고 주탑의 축력변동에 의한 국부좌굴의 특성이 고려되어 있지 않다. 향후, 국부좌굴 후 교량의 실제 거동을 보다 정밀하게 모사하기 위해서는 이들 특성을 고려할 수 있는 모델의 개발이 필요하며 더불어 입력운동의 수직성분 특성과 2방향 동시하중에 대한 교량의 비선형거동 특성에 대한 연구도 필요하다고 할 수 있다.

감사의글

이 연구는 한국과학재단 후원인 한국지진공학연구센터(KEERC) 연구의 일환으로 연구 과제 번호 R11-1997-045-120006-0의 지원을 받았다.

참고문헌

1. Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. "ABAQUS/Standard User's Manual", ver. 6.3, 2002
2. Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. "ABAQUS/Theory Manual", ver. 6.3, 2002
3. 장승필, 이경찬, 김광수, "제2진도대교의 초기형상결정해석", 대한토목학회 2003년도 정기 학술대회 논문집, pp.675-680, 2003.
4. 내진설계기준연구(II), 1권(1997), 한국지진공학회
6. 김호경, 유동호, 주석범, "현수교의 지진응답 평가", 한국지진공학회 논문집, Vol.7, No.1, 2월., 2003, pp.57-63.