

현수교의 지진응답 평가

Evaluation of Seismic Response for a Suspension Bridge

김 호 경* 유 동 호** 주 석 범***
Kim, Ho Kyung Yoo, Dong Ho Chu, Seok Beom

국문요약

현수교의 지진응답 산정 시 몇 가지 해석법 간에 발생될 수 있는 차이를 파악하고자 하나의 예제 현수교에 대해 비교 연구를 수행하였다. 주된 검토항목은 선형과 비선형 응답, 응답스펙트럼법과 동적해석법, 그리고 감쇠율과 감쇠고려 방안이다. 검토 결과 대상 물리량이나 가진 방향에 따라 약간의 차이는 있지만 전체적으로 감쇠율과 감쇠 고려방안 등 감쇠와 관련된 변수가 지진응답에 큰 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 반면 응답스펙트럼법과 동적해석법, 선형 및 비선형해석법 등 구조해석법에 관련된 변수는 상대적으로 지진응답에 미치는 영향이 적은 것으로 확인되었다. 대상 현수교의 경우에도 응답스펙트럼법이 안전측의 결과를 줄 수 있을 것으로 기대되지만 이 경우 도로교설계기준에 제시된 설계응답스펙트럼을 감쇠율에 따라 적절히 보정하는 사전 작업이 필요할 것으로 판단되었다.

주요어 : 현수교, 지진응답, 비선형, 응답스펙트럼법, 동적해석법, 감쇠, 지진

ABSTRACT

A comparative study was performed for a suspension bridge to grasp the possible differences in seismic responses evaluated by several analytical methods. The items mainly investigated are the linear vs. nonlinear response, the response spectrum method vs. the linear dynamic analysis method, and the damping ratio and its implementation into analysis procedures. According to the numerical example, it is found that the seismic responses are considerably affected by the damping-related parameters even though slight differences are shown depending on the response quantities and the exciting directions. On the other hand, it is also confirmed that the seismic responses are less affected by the analysis method-related parameters such as the response spectrum method vs. the linear dynamic analysis method, and the linear and nonlinear analysis method. The response spectrum method is expected to give conservative results for the examined bridge, provided that the design response spectrum in the Korean Highway Design Specification is modified according to the proper damping ratio.

Key words : suspension bridge, seismic response, nonlinear, response spectrum method, dynamic analysis method, damping, earthquake

1. 서 론

지진하중은 풍하중과 더불어 현수교의 주요 설계하중 중의 하나이다. 지진은 확률적으로 정의되는 하중으로서 이에 대해 구조물의 응답을 적절히 산정하는 것은 구조물의 안전성과 경제성을 확보하기 위한 중요한 수단이라 할 수 있다. 현수교 지진해석과 관련된 현대적 논문은 Abdel-Ghaffar에 의해 시작되었다고 볼 수 있다. 그는 주파수영역 해석법을 제시하였으며 수직⁽¹⁾, 횡방향⁽²⁾, 비틀림 진동⁽³⁾에 대한 연구결과를 차례로 발표했으며 주탑 간의 거리가 멀어 각 지점의 입력지진이 달라지는 다지지점 효과를 고려하기 시작하였다. 국내의 경우 현창현⁽⁴⁾은 다지지점 지진하중을 받는 현수교의 비정상 거동해석을 발표하였고 김호경과 서정인⁽⁵⁾은 사장식 현수교에 대해 시간영역에서의 기하비선형 다지지점 해석을 발표하였다.

초기의 연구들이 현수교 자체의 해석에 집중하고 지진의 특성은 비교적 단순화시키는데 비하여 최근의 연구는 교량과 지반의 상호작용 효과, 지진의 공간분포특성 등을 엄밀히 고

려하고자 하고 있다.⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾

이상과 같이 연구차원에서의 해석법은 다양한 변수를 고려하며 변화하고 있지만 실제 현수교의 설계 시 보편적으로 사용되는 방법은 다중모드 응답스펙트럼법이다. 지간길이 200m이하의 도로교뿐만 아니라 현수교나 사장교와 같은 특수교량의 설계 시에도 적용되고 있는 이 방법은 물론 선형 해석법이다. 그러나 현수교는 특유의 유연성으로 인해 기하비선형성을 보일 수 있기 때문에 이와 같은 해석법이 어느 정도 타당할 것인지에 대해서는 보다 심도 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다. 특히 현수교의 지진응답에 영향을 미칠 지반이나 지진의 다양한 변수를 고려하는 것과는 별도로 기존의 해석법에 대한 고찰도 필요하다고 사료된다.

이러한 배경아래 본 연구에서는 하나의 예제 현수교에 대해 가능한 몇 가지 해석법을 적용해 지진응답을 평가하고 각 방법간 발생될 수 있는 차이를 파악해 보고자 하였다. 구체적인 평가항목으로는 3가지를 고려하였으며 첫째는 응답스펙트럼법과 선형 모드중첩법, 둘째는 선형 모드중첩법과 선형 직접적분법, 마지막으로 선형 직접적분법과 비선형 직접적분법 간의 응답 비교이다. 이 과정에서 구조 감쇠율의 결과와 감쇠의 고려 방법 또한 평가의 대상으로 고려하였다. 각 해석 방법은 이미 널리 알려진 것으로서 이론적으로 본 연구에서 새롭게 제안되는 것은 아니지만 현수교와 같은 특수 구조에 대한 선형화유한변위해석이나 대변위해석 등을

* 정회원 · Mokpo대학교 건축조경토목공학부 부교수(내표저자 : hkkim@mokpo.ac.kr)

** 정회원 · (주)유신코퍼레이션 이사

*** 정회원 · 세명대학교 토목공학과 전임강사

본 논문에 대한 토의를 2003년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2003. 1. 11 / 심사종료일 : 2003. 2. 6)

적용해 결과를 얻어야 하는 것이므로 본 연구에서는 각 해석법 별로 직접적인 비교를 위해서 몇 가지 사항을 고려하였다. 이하 사용된 해석 프로그램과 모델링 방안을 제시하고 검토 결과로부터 현재 설계 시 일반적으로 적용되고 있는 응답스펙트럼법과 비선형해석법 간의 차이를 규명하고 이때 그 차이를 발생시키는 가장 큰 해석 인자를 파악하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 대상 교량 및 해석 모델

2.1 대상 교량의 형식 및 제원

본 연구에서 채택한 대상 교량은 그림 1과 같이 플로팅시스템(floating system)을 채택하고 있는 현수교로서 경간은 190m-750m-190m로 구성되어 있다. 보강형은 그림 2와 같이 왕복 2차선 유선형 강박스 형식이며 주탑의 기둥부는 철근

콘크리트 구조, 가로보는 프리스트레스트 콘크리트 구조 형식을 취하고 있다. 이 교량은 거금도 연도교 II단계 가설공사에 응모안으로 실시설계된 것으로서 표 1은 보강형, 주케이블 및 행어 등의 단면값을 나타내고 있다.

2.2 해석 프로그램

본 연구에서 고려할 해석은 다음과 같다.

- 고정하중에 대한 비선형 정적해석
- 고유진동해석
- 응답스펙트럼법에 의한 지반운동 해석
- 모드중첩법에 의한 지반운동 해석
- 직접적분법에 의한 선형 및 비선형 지반운동 해석

기하비선형해석이 가능한 범용 프로그램이라면 위의 해

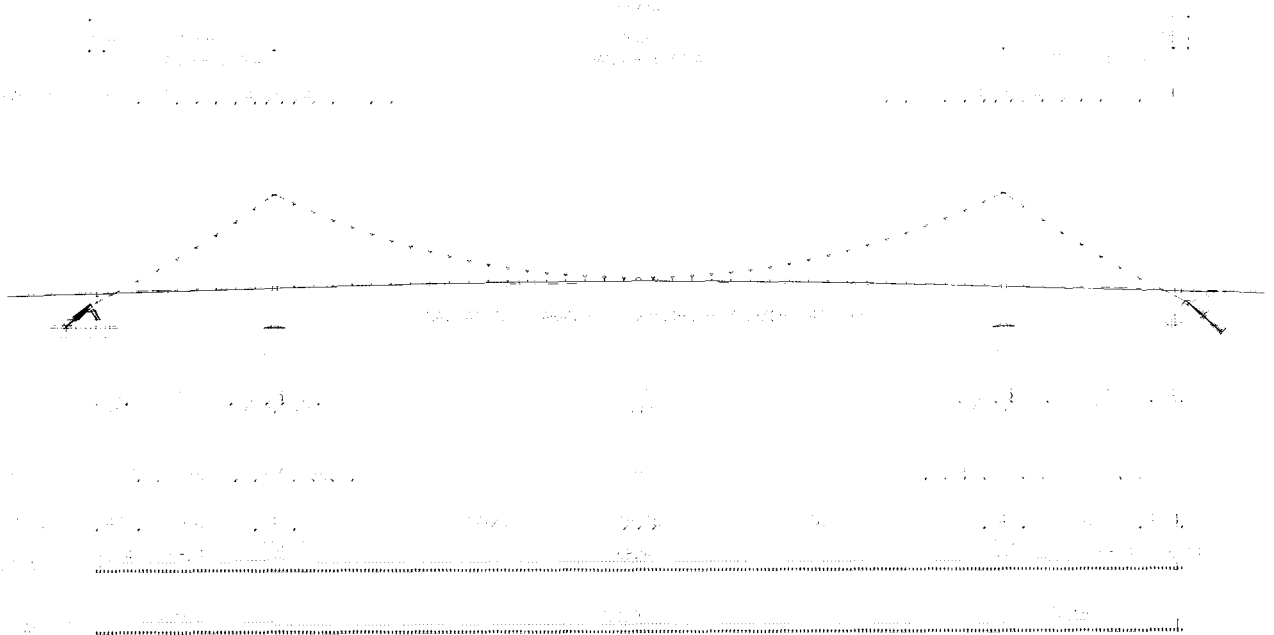


그림 1 대상 교량

표 1 대상 교량의 단면 제원

구분	단면	단면적 (m ²)	단면이차모멘트 (m ⁴)		비틀 상수 (m ⁴)	질량극관성 모멘트 (tonfm ² /m)	단위 길이당 중량 (tonf/m)
			약축	강축			
보강형	Section 1	0.6874	0.9142	15.6311	2.016	175.6	-
	Section 2	1.1732	1.7738	18.4716	4.747	-	-
	Section 3	0.6267	0.9215	9.5066	2.010	175.6	-
주 케이블	주경간	0.1045	-	-	-	-	0.820
	측경간	0.1141	-	-	-	-	0.896
센터 스테이	보강형부	0.0198	0.000428	0.000203	0.000418	-	-
	케이블부	0.0347	0.000979	0.00243	0.00214	-	-
행어	H1	0.003963	-	-	-	-	0.0333
	H2	0.004664	-	-	-	-	0.0392
	H3	0.010476	-	-	-	-	0.0881

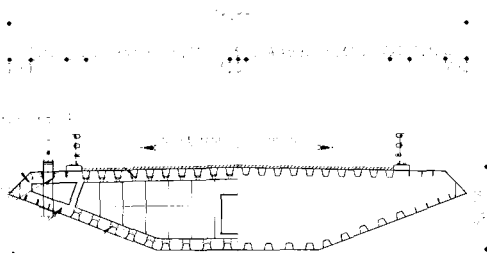


그림 2 보강형 단면

석은 대부분 가능하며 본 연구에서는 ABAQUS 5.8⁽⁹⁾을 사용하였다.

2.3 해석 모델

보강형과 주탑은 2절점 3차 형상함수의 3차원 보요소(B33)를 사용하여 모델링하였으며 주케이블과 행어는 2절점 3차원 트러스요소(T3D2)를 사용하여 모델링하였다. 주탑과 보강형 사이의 윈드 슈 모델링을 위해 스프링요소(SPRING2)를 사용하였다.

그림 3은 대상 교량에 대한 3차원 해석모델을 나타낸 것이다.

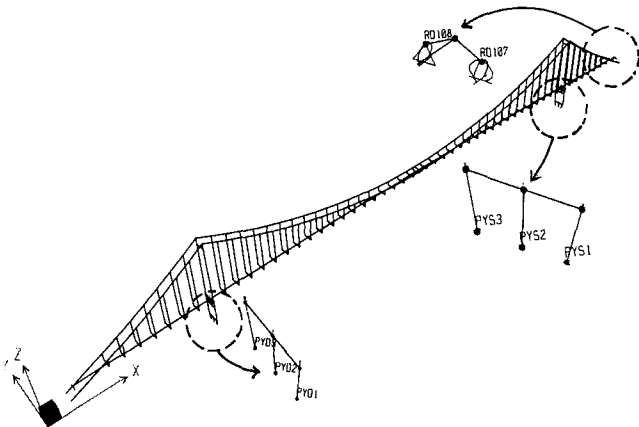


그림 3 해석 모델

고유진동해석, 응답스펙트럼해석, 선형 및 비선형 지반운동해석 모두에 대해 해석의 출발은 고정하중에 대한 정적 평형상태에서 출발하게 된다.⁽¹⁰⁾ 선형해석은 이 정적 평형상태를 기준으로 하는 미소변형 해석이며, 고정하중에 의해 케이블에 소기의 장력이 도입된 상태에서의 접선강도행렬을 구성하여 다음과 같이 추가하중 ΔF 에 대해 추가변위 Δu 를 구하는 것으로 설명할 수 있다. 이와 같은 방법을 선형화유한변위이론이라 한다.

$$K_T \cdot \Delta u = \Delta F \quad (1)$$

여기서 K_T 는 고정하중에 의한 초기평형상태에서의 접선강도행렬이다.

현수교 주케이블의 초기장력은 단위길이 당 교량의 고정하중 강도에 비례하게 되는데, 이 초기장력이 클수록 전체 구조계의 강성이 증가하게 된다. 접선강도행렬 K_T 는 케이블 장력의 함수가 되므로 활하중 해석의 신뢰도를 높이기 위해서는 고정하중에 의한 주케이블의 초기장력을 가급적 엄밀히 산정할 필요가 있다. 주케이블의 좌표와 함께 초기장력을 산정하는 과정을 형상해석(Shape-finding Analysis)⁽¹¹⁾라 한다.

동적 활하중에 대해 비선형 해석을 수행하는 경우라면 초기 불평형하중에 의해 예기치 못한 진동이 발생할 수 있으므로 고정하중과 부재내력 간의 엄밀한 초기평형상태를 구현하는 것이 더욱 중요한 선행조건이 된다.

본 연구에서는 Kim et al.⁽¹¹⁾이 개발한 초기형상해석 알고리즘을 따라 대상교량의 비선형 형상해석을 수행하였으며 이를 통해 얻게 된 주케이블의 절점 좌표와 초기장력, 그리고 주탑의 초기압축력 자료를 사용하여 ABAQUS 해석 모델을 작성하였다.

ABAQUS를 사용하여 고정하중이 모두 재하된 상태에서의 해석을 수행하였는데 이 때 케이블의 초기장력과 주탑의 초기압축력을 고려하기 위해 해당 부재에 initial stress 명령어를 적용하였다. 그 결과 형상해석법으로부터 얻은 자료로 구성된 해석 모델은 고정하중과 부재내력 사이에 자체 평형(self-equilibrium)이 이루어져 거의 추가 변형이 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.

3. 설계 스펙트럼 및 인공지진

3.1 설계 스펙트럼

본 연구에서 사용한 설계 스펙트럼은 현행 도로교설계기준⁽¹²⁾의 무차원 탄성지진응답계수 C_s 를 따라 다음 식으로 정의하였다.

$$C_s = \frac{1.2AS}{T^{2/3}} \quad (2)$$

여기서 A 는 가속도계수로서, 지진구역 I에 대한 지진구역계수 0.11을 적용하고 재현주기 1,000년에 해당되는 위험도계수 1.4를 적용함으로써 가속도계수는 1.54로 결정하였다. S 는 지반계수로서 지반종류 I에 대한 1.0을 적용하였으며 T 는 교량의 주기이다.

3.2 인공지진

응답스펙트럼법과 시간영역해석법의 비교를 위해서는 설계 스펙트럼과 일치하는 인공지진을 생성하여야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 SIMQKE⁽¹³⁾를 사용하여 목표 응답스펙트럼에 맞는 지반 가속도 시간이력 샘플을 생성하였다. 인공지진의 생성 시 식 (2)의 설계 응답스펙트럼이 구조물의 5% 감쇠를 고려한 것으로 간주하였다.

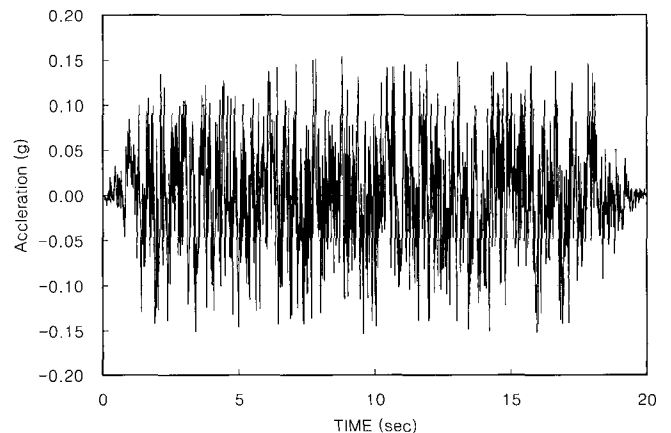


그림 4 생성된 지반 가속도 시간이력 샘플

그림 4는 생성된 인공지진 시간이력 샘플이며 그림 5는 생성된 인공지진의 응답스펙트럼을 식 (2)의 목표 응답스펙트럼과 비교한 것이다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 생성된 인공지진의 응답스펙트럼은 설계 응답스펙트럼과 잘 부합하고 있음을 알 수 있다.

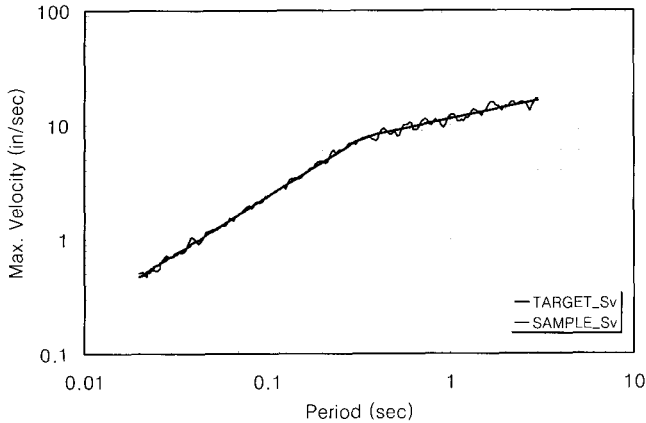


그림 5 샘플 및 목표 응답스펙트럼의 비교 ($\xi=0.05$)

4. 지반운동해석

4.1 고유진동해석

초기 평형상태를 바탕으로 고유진동해석을 수행하였다. 1차 모드는 횡방향 모드로서 0.6308rad/sec의 고유진동수를 보이며 2차모드는 역대칭 수직방향 모드와 종방향 모드가 합성된 것으로 0.8147rad/sec의 고유진동수를 나타냈다. 비틀림 모드는 16차 모드로서 2.6323rad/sec의 고유진동수를 나타냈다. 대표적인 모드에 대한 진동 형상을 그림 6에 나타내었다.

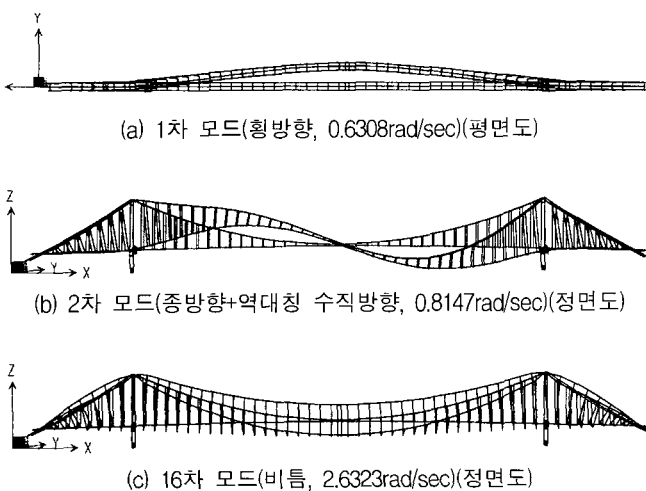


그림 6 대표 모드에 대한 진동 형상

3 직교축에 대한 질량기여율을 바탕으로 주요 모드를 결정하고 평균 고유진동수를 산정하여 Rayleigh 감쇠 계수 결정에 사용하였다. 주요모드는 표 2와 같이 결정하였다.

표 2 3직각방향 별 주요모드의 평균 진동수(rad/sec)

	수직 모드	종방향 모드	횡방향 모드
1	1.1382(3차)	0.8147(2차)	0.6308(1차)
2	1.5082(4차)	1.8799(6차)	2.0065(8차)
3	2.4232(12차)	1.9587(7차)	2.4995(13차)
4	2.6031(15차)	3.4157(21차)	3.9693(27차)
5	-	4.8525(34차)	-
평균	1.9182	2.5843	2.2765

4.2 해석법 및 감쇠

감쇠는 탄성 지진력 계산에 큰 영향을 미칠 수 있다. 교량의 감쇠를 이론적으로 산정하기에는 어려움이 따르지만 케이블교량의 경우 보통 한계감쇠의 1~2% 정도를 가정하는 것이 일반적이다. 해석법마다 감쇠를 고려할 수 있는 방법이 다르므로 다음과 같이 구조 감쇠를 결정하였다.

먼저 응답스펙트럼(CQC)법을 사용하는 경우, 도로교설계 기준의 응답스펙트럼이 기본적으로 5%의 감쇠를 가정하고 있는 것이므로 식 (2)를 그대로 사용할 경우 고려 모드에 대해 일괄적으로 5%의 감쇠를 적용한 것과 같다.

반면 시간영역해석법에서는 2가지 방법으로 감쇠를 고려할 수 있다. 모드중첩법을 사용하는 경우에는 각 모드별 감쇠를 정의해 주는 것이 일반적이지만 직접적분법을 사용하는 경우에는 모드가 분리되어 있는 것이 아니므로 모드별로 감쇠를 정의해줄 수 없다. 이 경우에는 Rayleigh 감쇠를 사용할 수 있지만 원칙적으로 Rayleigh 감쇠는 2모드에 대해서만 정확히 모달 감쇠를 맞출 수 있다. 따라서 4.1절에서 구한 주요 수직모드 평균 진동수 1.9182rad/sec와 주요 종방향모드 평균 진동수 2.5843rad/sec에 대해 2%의 감쇠를 가정한 Rayleigh 감쇠계수를 산정하였다.⁽¹⁴⁾ 그 결과는 다음과 같다.

$$[C] = 0.044046[M] + 0.008883[K] \quad (3)$$

이 경우 각 모드 별 고려된 감쇠율은 식 (4)와 같고 그림 7은 이를 그래프로 나타낸 것이다.

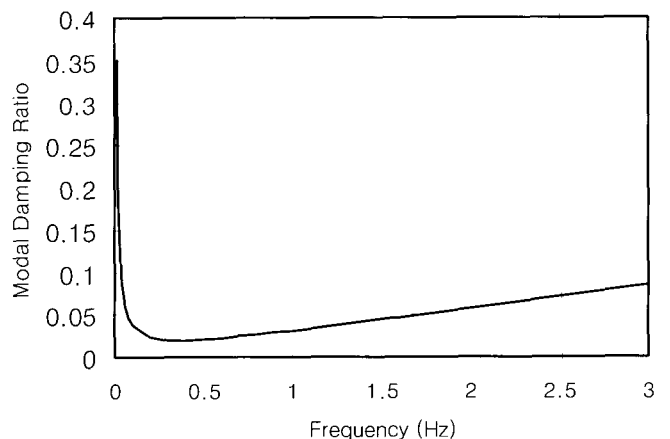


그림 7 진동수와 모달 감쇠비 ξ 의 관계

$$\xi_i = \frac{0.044046 + 0.008883\omega_i^2}{2\omega_i} \quad (4)$$

4.3 해석법 간의 비교 방안

그림 4의 가속도 시간이력 샘플을 사용하여 모드중첩법으로 지진해석을 수행하였다. 먼저 모드별 감쇠율은 5%를 적용하고 그 결과를 응답스펙트럼법과 비교하였다.

현수교에 대해 5%의 감쇠율을 적용하는 것은 불안전축으로 판단되므로 비교의 목적으로 2%의 감쇠율을 적용한 모드중첩법을 통해 감쇠율에 따른 응답의 차이를 비교해 보았다.

비선형 해석을 수행하는 경우 감쇠는 Rayleigh 감쇠를 적용할 수밖에 없다. 그러나 응답스펙트럼법이나 모드중첩법은 각 모드별 감쇠율을 적용한 반면 Rayleigh 감쇠는 앞서 검토한 바와 같이 각 모드별로 상이한 감쇠율이 적용되므로 이에 대한 적절한 보정 없이 선형 해석과 비선형 해석 결과를 비교하는 것은 무의미하다고 판단된다. ABAQUS를 사용할 경우, 모드중첩법 해석 시 각 모드별 감쇠율을 동일하게 적용할 수도 있지만 Rayleigh 감쇠를 따라 계산되는 식 (4)의 감쇠율을 각 모드별로 적용할 수 있는 옵션이 있다. 따라서 본 연구에서는 모드중첩법에 의해 전 모드 2% 감쇠율을 적용하는 경우와 식 (4)의 Rayleigh 감쇠를 바탕으로 모드중첩법을 적용하는 경우의 해석 차이를 먼저 규명한 뒤, Rayleigh 감쇠를 적용한 선형과 비선형 해석결과를 비교하고자 하였다.

4.4 해석 Case 별 응답 비교

대상 교량은 플로팅시스템의 현수교로서 주탑에서 수직 방향으로 보강형을 특별히 지지하고 있지 않다. 보강형의 종방향 변위를 제어하기 위해서 그림 2에 보인 바와 같이 보

강형 한 쪽 단부에 변위제어 및 충격흡수용 버퍼를 설치하였으며 해석 시에는 이 버퍼를 무시하고 종방향으로 물리 조건을 부여하는 방안과 역으로 종방향 변위를 구속하는 힌지 조건 두 가지로 고려하였다.

각 해석 Case마다 다음의 5가지 해석을 수행하였다.

- 선형 해석(응답스펙트럼법, $\xi=0.05$)
- 선형 해석(모드중첩법, 모달감쇠, $\xi=0.05$)
- 선형 해석(모드중첩법, 모달감쇠, $\xi=0.02$)
- 선형 해석(모드중첩법, Rayleigh 감쇠, $\xi=0.02$)
- 비선형 해석(직접적분법, Rayleigh 감쇠, $\xi=0.02$)

- ① Case 1 : 단부 버퍼를 무시하여 종방향으로 물리 조건을 부여하고 종방향으로 가진
- ② Case 2 : 단부 버퍼를 무시하여 종방향으로 물리 조건을 부여하고 횡방향으로 가진
- ③ Case 3 : 단부 버퍼를 고려하여 종방향으로 힌지 조건을 부여하고 종방향으로 가진

각 해석 방법 간의 응답량 비교를 위해 여러 물리량 중 다음 두 가지를 고려하였다. 먼저 주탑 하단부 반력 모멘트를 검토하였는데, 주탑 절점 PYD1, PYD2, PYD3 또는 PYS1, PYS2, PYS3의 모멘트 반력을 검토하였다. 각 절점 번호는 그림 2를 참조한다. 이 때 단면 두 주축 중, 가진 방향에 대해 직각인 주축에 대한 모멘트 반력만 검토하였다. 둘째로는 단부 버퍼 고려 시 최대 수평 반력을 검토하였는데 종방향 가진 시에 대해서만 RD107과 RD108 절점의 수평반력을 검토하였다.

해석 Case 별 결과를 표 3~5에 비교 수록하였다.

표 3 Case 1(단부 버퍼를 무시 종방향으로 가진)에 대한 해석결과

물리량	절점	응답스펙트럼 대 모드중첩법				선형 대 비선형			모달감쇠 대 Rayleigh 감쇠	응답스펙트럼 대 비선형		
		(1) 응답스펙트럼	(2) 선형 모달 감쇠 5%	(3) 선형 모달 감쇠 2%	(4) 모드중첩/ 응답스펙트럼 (2)÷(1)	(5) 선형 Rayleigh 감쇠 2%	(6) 비선형 Rayleigh 감쇠 2%	비선형/ 선형 (6)÷(5)	Rayleigh 감쇠/ 모달감쇠 (5)÷(3)	(7) 비선형/ 응답스펙트럼 (6)÷(1)	감쇠를 보정한 경우 (7)÷(4)	
교축 직각축 (Y축)에 대한 모멘트 반력 (tonf-m)	PYD1	7,281	7,487	9,662	1.028	1.291	8,409	8,492	1.010	0.870	1.166	0.903
	PYD3											
	PYD2	4,651	4,668	5,997	1.004	1.285	5,313	5,500	1.035	0.886	1.183	0.921

표 4 Case 2(단부 버퍼를 무시 횡방향으로 가진)에 대한 해석결과

물리량	절점	응답스펙트럼 대 모드중첩법				선형 대 비선형			모달감쇠 대 Rayleigh 감쇠	응답스펙트럼 대 비선형		
		(1) 응답스펙트럼	(2) 선형 모달 감쇠 5%	(3) 선형 모달 감쇠 2%	(4) 모드중첩/ 응답스펙트럼 (2)÷(1)	(5) 선형 Rayleigh 감쇠 2%	(6) 비선형 Rayleigh 감쇠 2%	비선형/ 선형 (6)÷(5)	Rayleigh 감쇠/ 모달감쇠 (5)÷(3)	(7) 비선형/ 응답스펙트럼 (6)÷(1)	감쇠를 보정한 경우 (7)÷(4)	
교축(X축)에 대한 모멘트 반력 (tonf-m)	PYD1	3,574	3,179	4,189	0.889	1.318	3,462	3,762	1.087	0.826	1.053	0.799
	PYD3											
	PYD2	7,311	6,608	8,702	0.904	1.317	7,017	7,625	1.087	0.806	1.043	0.792

표 5 Case 3(단부 버퍼를 고려 종방향으로 가진)에 대한 해석결과

물리량	절점	응답스펙트럼 대 모드중첩법					선형 대 비선형			모달감쇠 대	응답스펙트럼 대 비선형	
		(1) 응답스펙트럼	(2) 선형모달감쇠 5%	(3) 선형모달감쇠 2%	모드중첩/응답스펙트럼 (2)÷(1)	(4) 2%감쇠/5%감쇠 (3)÷(2)	(5) 선형 Rayleigh 감쇠 2%	(6) 비선형 Rayleigh 감쇠 2%	비선형/선형 (6)÷(5)	Rayleigh 감쇠/모달감쇠 (5)÷(3)	(7) 비선형/응답스펙트럼 (6)÷(1)	감쇠를 보정한 경우 (7)÷(4)
교축 직각축 (Y축)에 대한 모멘트 반력 (tonf-m)	PYS1	10,012	9,596	13,042	0.958	1.359	11,909	11,770	0.988	0.913	1.176	0.865
	PYS3											
	PYS2	6,456	6,131	8,310	0.950	1.355	7,661	7,631	0.996	0.922	1.182	0.872
수평반력 (tonf)	RD107	538.3	453.0	610.0	0.842	1.347	556.4	562.0	1.010	0.912	1.044	0.775
	RD108											

4.5 결과 분석

4.5.1 응답스펙트럼과 모드중첩법의 비교

본 연구에서 사용된 응답스펙트럼법은 CQC법으로서 표 3~5에 응답스펙트럼법에 의한 결과와 모드중첩법에 의한 결과를 직접 비교 수록하였다. 단부 버퍼를 무시한 경우, 주탑 하부의 모멘트 반력에 대해서는 종방향 가진 시는 불과 3% 이내의 차이만을 보이거나 횡방향 가진 시는 약 11%의 오차가 발생함을 알 수 있었다. 단부 버퍼를 고려한 종방향 가진의 경우 모멘트 반력은 약 5% 정도의 차이를 보이고 있으나 보강형 단부 버퍼에서의 수평 반력은 약 16% 정도로 그 차이가 크게 되는 것을 알 수 있었다. 단, 차이가 크게 발생하는 경우 대부분 응답스펙트럼법에 의한 응답이 크게 산출되어 안전측의 결과를 줌을 알 수 있었다.

4.5.2 감쇠율에 따른 응답 비교

2%와 5% 감쇠율에 대한 응답을 모드중첩법으로 산정하고 그 결과를 표 3~5에 비교 수록하였다. 감쇠율의 변화는 응답에 크게 영향을 미쳐 작게는 29%에서 많게는 36%의 응답 차이를 유발하는 것으로 확인되었다.

현행 도로교설계기준의 응답스펙트럼이 5% 감쇠를 가정하고 있으나 현수교 등 케이블지지교량의 감쇠율은 이보다는 낮은 것으로 판단되므로 내진 설계 시 도로교설계기준의 응답스펙트럼을 적절히 보정하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

4.5.3 선형응답과 비선형응답의 비교

그림 8은 종방향 가진 시 주탑하부의 반력 모멘트에 대한 응답 이력으로서 선형과 비선형 응답이 거의 같음을 나타내고 있다. 표 3~5에 수록된 결과를 바탕으로 선형응답과 비선형응답은 종방향 가진 시 약 4% 이내의 적은 차이를 보임을 알 수 있었다. 그러나 횡방향 가진시에는 그 차이가 약 9% 정도로 증가함을 확인하였고 특히 비선형 응답의 결과가 선형 응답의 결과보다 크게 나타나 선형해석이 불안전 측인 것으로 판단되었다. 그러나 이러한 차이는 감쇠와 관련되어 발생할 수 있는 차이보다는 비교적 적은 것으로 판단된다.

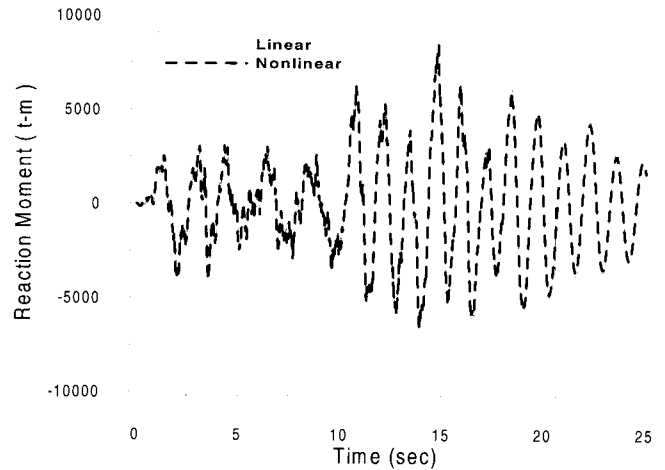


그림 8 종방향 가진에 따른 주탑하부 PYD1 절점 반력 모멘트의 선형 및 비선형 응답

4.5.4 감쇠 고려 방법의 비교

구조 해석 시 일반적으로 널리 사용되고 있는 모달 감쇠와 Rayleigh 감쇠에 따른 응답 차를 평가하기 위하여 2% 감쇠를 가정한 모드중첩법 해석을 통해 표 3~5에 그 차이를 비교해 보았다.

4.2에서 설명한 바와 같이 주요 수직모드 평균 진동수 1.9182rad/sec와 주요 종방향모드 평균 진동수 2.5843rad/sec에 준해 결정된 Rayleigh 감쇠는 이 두 진동수에 대해서만 2% 감쇠를 정의할 수 있고 그림 7에 보인 바와 같이 다른 영역대의 진동수에 대해서는 일반적으로 감쇠가 크게 산정된다. 그 결과 표 3~5에 보인 바와 같이 Rayleigh 감쇠를 사용한 해석 결과가 전 모드 2% 감쇠를 고려한 해석 결과보다 적게는 약 8%, 많게는 약 20% 정도 감소된 응답을 보이고 있다.

따라서 구조 감쇠율의 가정 못지않게 감쇠의 고려 방법도 지진응답 평가에 미치는 영향이 큰 것으로 확인되었다.

4.5.5 응답스펙트럼법과 비선형해석법과의 비교

내진 응답 평가 시 가장 극단적인 해석법은 응답스펙트럼법과 엄밀한 비선형해석법이라고 볼 수 있다. 전자는 고유진동해석 자료를 토대로 실제 동적해석을 수행하지 않고 응답을 평가할 수 있는 손쉬운 방법인 반면 후자는 기하비선형

성에 대한 이해와 직접적분법에 따른 시간 소요 등을 감안할 때 전자보다는 어려운 해석이 될 것이다.

두 극단적인 해석법의 비교 결과는 표 3~5로부터 적게는 약 4%, 많게는 약 18% 정도 비선형해석 결과가 응답스펙트럼법보다 더 큰 응답을 보이고 있는 것으로 확인되었다. 이러한 정량적인 비교 수치 속에는 여러 해석 인자에 의한 영향이 복합되어 있는데 4.5.1~4.5.4에서 언급한 4가지 인자가 그 것이다. 비선형해석 결과가 크게 된 이유로는 무엇보다도 감쇠율의 차이를 들 수 있다. 비선형해석에서는 2%의 구조 감쇠를 고려한 반면 도로교설계기준의 응답스펙트럼은 5% 감쇠를 가정하고 있기 때문이다. 물론 비선형해석에서는 Rayleigh 감쇠를 사용하였으므로 실제로는 2% 이상의 감쇠 효과가 있을 수 있다. 표 3~5 마지막 열은 감쇠를 보정한 경우의 극단적인 해석법의 응답비교를 나타내고 있다. 그 결과 비선형 응답은 응답스펙트럼법에 의한 응답에 비해 10%~22% 정도 감소된 결과를 보이게 됨을 알 수 있었다.

이와 같이 대상 물리량이나 가진 방향에 따라 약간의 차이는 있지만 전체적으로 감쇠율과 감쇠 고려방안 등 감쇠와 관련된 변수가 지진응답에 큰 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 반면 응답스펙트럼과 모드중첩법, 모드중첩법과 비선형해석법 등 구조해석법에 관련된 변수는 지진응답에 미치는 영향이 상대적으로 적은 것으로 확인되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 하나의 대상 현수교에 대해 여러 지진응답 평가방법 간의 해석 결과를 비교해 보았다. 각 방법간의 비교를 위해 검토 조건은 최대한 동일하게 만들고자 하였다. 해석모델은 보강형 단부의 버퍼를 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우 두 가지로 구분하였으며 가진 방향은 종방향과 횡방향 가진을 분리하여 고려하였다.

대상 물리량이나 가진 방향에 따라 약간의 차이는 있지만 전체적으로 감쇠율과 감쇠 고려방안 등 감쇠와 관련된 변수가 지진응답에 큰 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 반면 응답스펙트럼과 모드중첩법, 모드중첩법과 비선형해석법 등 구조해석법에 관련된 변수는 지진응답에 미치는 영향이 상대적으로 적은 것으로 확인되었다.

본 연구에서 수행된 검토범위 내에서의 결과를 종합적으로 판단할 경우, 지간길이 200m 이하의 도로교에 적용되는 응답스펙트럼법이 본 연구의 대상교량에도 적용되어 안전측의 결과를 줄 수 있을 것으로 기대되지만 이 경우 도로교설계기준에 제시된 응답스펙트럼의 감쇠율을 일반적인 현수교의 감쇠율로 적절히 보정하는 사전 작업이 반드시 필요함을 알 수 있었다.

그러나 객관적인 결론 도출을 위해서는 경간길이나 구조형식이 상이한 보다 다양한 현수교에 대해서도 비교연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술재단 특정기초연구 과제번호 R01-2002-000-00265-0 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Abdel-Ghaffar, A. M. and Rubin, L. I., "Suspension bridge response to multiple-support excitations," *J. of Engineering Mechanics*, Vol. 108, No. 2, 1982, pp. 419-435.
2. Abdel-Ghaffar, A. M. and Rubin, L. I., "Lateral earthquake response of suspension bridge," *J. of Structural Engineering*, Vol. 109, No. 3, 1983, pp. 664-675.
3. Abdel-Ghaffar, A. M. and Rubin, L. I., "Torsional earthquake response of suspension bridge," *J. of Engineering Mechanics*, Vol. 110, No. 10, 1984, pp. 1467-1484.
4. 현창현, "현수교의 풍하중과 지진하중에 대한 추계론적 거동해석", 박사학위논문, 한국과학기술원, 1989, p. 116.
5. 김호경, 서정인, "다중지지된 자정식 현수교의 비선형 지진응답 해석", 한국지진공학회논문집, 제1권, 제3호, 1997, pp. 45-58.
6. Harichandran, R. S., Hawwari, A., and Sweidan, B. N., "Response of long-span bridges to spatially varying ground motion," *J. of Structural Engineering*, Vol. 122, No. 5, 1996, pp. 476-484.
7. 이장석, 김재관, 이원표, 조의경, "비균질 지반의 영향을 고려한 사장교의 지진응답해석", 2002학술발표회 논문집, 대한토목학회, 2002.
8. Allam, S. M. and Datta, T. K., "Response spectrum analysis of suspension bridges for random ground motion," *J. of Bridge Engineering*, Vol. 7, No. 6, 2002, pp. 325-337.
9. ABAQUS/Standard User's Manual, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1997.
10. 김호경, "케이블지지교량의 모델링 및 정·동적 비선형 해석에 대한 고찰", 한국강구조학회지, 제8권, 제2호, 1996, pp. 35-40.
11. Kim, H. K., Lee, M. J., and Chang, S. P., "Nonlinear shape-finding analysis of a self-anchored suspension bridge," *Engineering Structures*, Vol. 24, 2002, pp. 1547-1559.
12. 도로교설계기준, 한국도로교통협회, 2000.
13. Gasparini, D. A. and Vanmarcke, E. H., "Simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra," Dept. of Civil Engineering Constructed Facilities Division, Massachusetts Institute of Technology, 1976.
14. Bathe, K. J., *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, 1996.