

이산 폰툰형 부유식 교량의 지진응답 해석

Dynamic Analysis of Floating Bridge with Discrete Pontoons Subject to Earthquake Load

권장섭¹⁾ · 백인열²⁾ · 장승필³⁾

Kwon, Jang Sub · Paik, In Yeol · Chang, Sung Pil

ABSTRACT

Dynamic response analysis are conducted for a floating bridge subjected to multiple support earthquake excitation. The floating bridge used in this study is supported by discrete floating pontoons and horizontal pretension cables supported at both ends of the bridge. The bridge is modeled with finite elements and the hydrodynamic added mass and added damping due to the surrounding fluid around pontoons are obtained using boundary elements. Multiple support excitation is introduced at both ends of the bridge and the time history response is compared to that of a simultaneous excitation. The results shows that the differences between two results are not so large except for cable tension for which the multiple support excitation yields larger values. During the analysis the concept of retardation function is utilized to consider the frequency dependency of the hydrodynamic coefficients.

1. 서 론

부유식 교량은 기존 장대교량에 비하여 깊은 수심, 연약한 지반, 지진이 잦은 지역 등에서 유리하며, 시공 기간이 짧고 건설 과정에서 환경 손실이 적다는 장점을 갖는 구조 형식이다. 부유식 교량의 형식으로는 이산 폰툰형과 연속 폰툰형이 있다. 폰툰이 서로 떨어져 있는 이산 폰툰형 부유식 교량으로는 횡방향 아치형으로 수면에 접해 있어 주위 자연경관과 잘 조화된 노르웨이의 Bergsöysund 교량(Solland, 1993)이 대표적이며, 폰툰이 연속된 연속 폰툰형 부유식 교량으로는 미국 시애틀의 워싱턴호를 가로지르며 하루 10만대 이상의 차량이 통과하는 Lacey Murrow 교량(Lwin, 1993)이 유명하다.

부유식 교량에 대한 기존의 연구들에서 보면, 파랑하중 산정을 위한 계수와 유체의 부가질량계수 및 감쇠계수가 주파수 의존성이 있으므로 주로 주파수영역해석이 행해졌다. 시간영역 해석이 수행된 경우에는 계수들의 주파수 의존성을 고려하지 않고 일정한 값을 사용하여 단순화하였다(Hartz, 1981). 백인열 등(2002)은 시간영역 해석 시 동수력 계수의 주파수 의존성을 고려하기 위하여 시간지연함수를 사용하여 부유식 교량의 파랑하중 응답해석을 수행하였다. 이 연구에서는 부

1) 서울대학교 지진공학연구센터, 전임연구원, 공학박사

2) 정회원 · 강원대학교 토목환경공학과, 부교수, 공학박사

3) 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수, 공학박사

유식 교량에 작용하는 다른 주 하중의 하나인 지진하중에 대하여 동수력 계수의 주파수 의존성을 고려한 시간영역해석을 수행하였다. 해석 예로는 그림 1과 같은 GVA 부유식 교량과 유사한 형식의 교량을 선택하여, 유체의 효과를 고려한 교량의 자유진동 모드를 구하고, 지진하중 응답해석에는 1979년 미국에서 계측된 지진을 입력지진으로 하였다. 지진하중 해석 시 다중지지 효과를 고려하기 위하여 지진파가 한 지점에서 다른 지점으로 형상변화 없이 이동한다고 가정하였다(김호경 등, 1997).

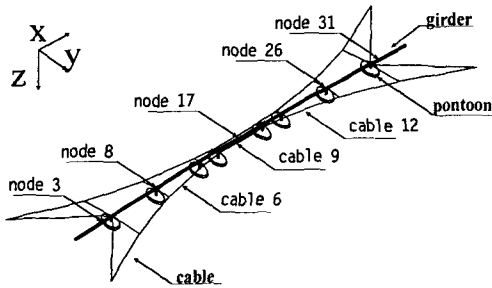


그림 1 횡방향 케이블로 지지된 이산 폰툰형 부유식 교량 모델

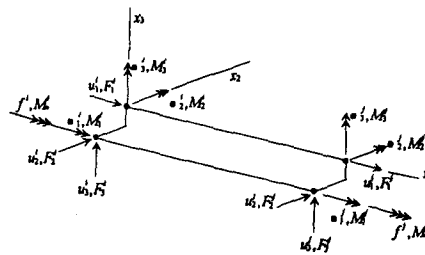


그림 2 뼈대요소의 변위 및 단면력 정의

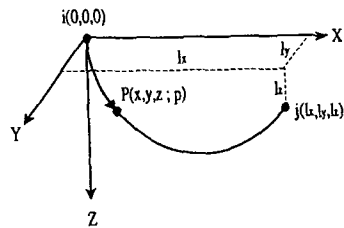


그림 3 탄성현수선 요소의 형상

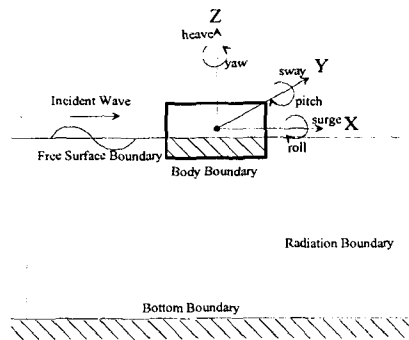


그림 4 폰툰의 좌표계

2. 부유식 교량의 유한요소 모델링

이산 폰툰형 부유식 교량의 상부 구조계는 3차원 뼈대요소와 탄성 현수선 케이블요소로 모델링하고 하부 폰툰의 부력변화는 스프링으로 모델링한다.

보강형을 모델링하기 위해 사용한 3차원 뼈대요소는 그림 2와 같이 부재의 단면이 비대칭인 경우도 해석할 수 있도록 단면중심 C와 전단중심 S를 구분하여 정의하고, 부재축에 따른 길이 방향으로 단면의 크기가 일정하게 가정된 요소이다(현대건설, 1994). 이 요소의 접선강도행렬 K_T 는 부재탄성강도행렬 K_E 와 부재기하강도행렬 K_G 을 이용하여 일반적으로 다음과 같이 나타낸다.

$$K_T = K_E + K_G \quad (1)$$

분포 질량행렬은 운동에너지의 1차 변분을 단면 도심에서의 변위로 표시하고 이 변위와 부재

절점 변위와의 관계를 이용하여 적분함으로써 구한다.

이 연구에서 사용한 케이블 요소는 그림 3과 같은 형상의 탄성현수선 요소이다(장승필 등, 1989). 케이블 요소의 강도행렬은 자중을 받는 탄성현수선 요소의 비선형 미분방정식의 정해를 사용하여 구성한다. 케이블 절점력에 관한 비선형 적합방정식의 미분으로 유연도 행렬을 얻어낸 후 이로부터 강도행렬을 구한다. 질량 행렬은 유한요소 형상함수를 이용하여 구한 분포질량을 사용한다.

3. 폰툰의 동수역학 계수 산정

부유식 교량의 폰툰과 같이 크기가 큰 부유체에 작용하는 파력과 운동에 대한 동수 역학적 문제는 주로 선형 포텐셜 이론으로 다룬다. 그림 4에 폰툰에 대한 기준 좌표계와 자유도 및 경계를 나타내었다. 파고와 폰툰의 운동의 크기가 폰툰의 크기에 비하여 작다고 가정할 경우 수면과 잠긴 면에서의 경계 조건이 선형화 될 수 있고 유체를 비점성, 비압축성으로 흐름은 비회전성으로 가정하면 식 (2)와 같은 속도 포텐셜 함수 ϕ 가 존재한다(Newman, 1986).

$$\phi = \phi(x, y, z)e^{-i\omega t} = -i\omega e^{-i\omega t} \sum_{j=0}^7 \phi_j \zeta_j \quad (2) \quad \nabla^2 \phi = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \phi = 0 \quad (3)$$

여기서, $i = \sqrt{-1}$, ω 는 주파수, ϕ_j ($j=1, \dots, 6$)는 폰툰의 j 방향 운동에 대한 방사 포텐셜이고, 이중 ϕ_0 와 ϕ_7 은 각각 입사파와 회절파의 속도 포텐셜이며, ζ_j 는 폰툰의 j 방향 운동의 진폭이다.

또한 선형화된 자유수면 경계조건, 해저면과 폰툰의 잠긴 면에서의 경계조건 그리고 폰툰으로부터 먼 거리에서 빠져나가는 파를 규정하는 유일성 조건을 만족해야 한다.

위의 식 (3)과 경계조건으로 주어진 선형 경계값 문제를 이 연구에서는 고차경계요소법을 이용하여 해석한다(Chang et al., 1992). 이 연구에서 사용한 고차경계요소는 기하형상함수와 포텐셜 분포형상함수가 같은 등매개변수 8절점 사각형 요소와 6절점 삼각형 요소이다.

4. 부유식 교량의 운동방정식

4.1 동수력계수의 주파수 의존성 고려

폰툰의 동수력계수인 부가질량계수와 감쇠계수는 주파수에 따라 변하는 값이다. 이 연구에서는 주파수 의존 부가질량으로부터 주파수 의존 성분을 제거한 독립적인 부가질량과 주파수 의존 감쇠계수를 푸리에 변환시켜 얻은 시간지연함수를 이용하여 폰툰에 작용하는 유체력을 산정하였다(Cummins, 1962). 폰툰의 운동에 대하여 부가질량에 의한 관성력과 시간지연함수와 폰툰의 운동 속도를 회선적분하여 얻은 유체력을 고려하면 이산 폰툰형 부유식 교량의 운동방정식은 다음과 같다.

$$([M] + [m])\{\dot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + \int_0^t [h(t-\tau)]\{\dot{U}_s(\tau)\}d\tau + ([K] + [r])\{U\} = \{F\} \quad (4)$$

$$h_k(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty b_k(\omega) \cos \omega t \, d\omega \quad (5) \quad m_{kj} = a_{kj}(\omega) + \frac{1}{\omega} \int_0^\infty h_{kj}(t) \sin \omega t \, dt \quad (6)$$

여기서, $\{U\}, \{\dot{U}\}, \{\ddot{U}\}$ 는 각각 교량의 변위, 속도, 가속도벡터, $\{\bar{U}_b\}$ 는 폰톤의 속도벡터, $[M]$ 는 교량의 질량행렬, $[m]$, m_b 는 주파수에 무관한 독립적인 부가질량행렬, $[C]$ 는 교량의 감쇠행렬, $[h]$, h_b 는 시간지연함수행렬, $[K]$ 는 교량의 강도행렬, $[r]$ 은 폰톤의 유체정역학적 복원력행렬을 나타낸다.

4.2 지점운동에 의한 운동방정식

부유식 교량의 자유도를 지점운동을 직접 받는 부분과 그렇지 않는 부분으로 나누면 운동방정식은 다음과 같다(김호경 등, 1997).

$$\begin{bmatrix} M_{FF} & M_{FR} \\ M_{RF} & M_{RR} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U}_F \\ \ddot{U}_R \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{FF} & C_{FR} \\ C_{RF} & C_{RR} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U}_F \\ \dot{U}_R \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{FF} & K_{FR} \\ K_{RF} & K_{RR} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_F \\ U_R \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_F \\ F_R \end{Bmatrix} \quad (7)$$

여기서, 아래 첨자 R은 지반 운동의 작용점에 대응되는 자유도를 나타내고, 아래 첨자 F는 교량의 다른 모든 자유도에 대응된다.

자유 경계 성분만으로 운동방정식을 재정리하면 다음과 같다(현대건설, 1994).

$$M_{FF} \ddot{U}_F + C_{FF} \dot{U}_F + K_{FF} U_F = (M_{FF} K_{FF}^{-1} K_{FR} - M_{FR}) \ddot{U}_R \quad (8) \quad \begin{Bmatrix} U_F \\ U_R \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U_F^d \\ U_R^d \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} U_F^s \\ U_R^s \end{Bmatrix} \quad (9)$$

여기서, $[U_F^s \ U_R^s]^T$ 는 주어진 시간 t에 가상정적변위이고, $[U_F^d \ U_R^d]^T$ 는 가상정적변위 U^s 에 의해 생기는 동역학적 변위를 의미한다. 그 때 U_R^s 는 동역학적 지점 운동을 정의하며, U_R^d 는 영벡터가 된다. 그러므로 U_R 은 U_R^s 에 대응된다.

5. 예제

5.1 부유식 교량의 제원

대상 교량은 그림 1과 같이 케이블에 의해서 수평방향으로 지지되고, 폰톤의 부력에 의해서 수직방향으로 지지되는 구조형식이다. 백인열 등(2002)의 연구에서와 같은 제원의 부유식 교량을 사용하였으며 부유식 교량의 상부구조는 56개의 뼈대요소와 38개의 탄성현수선 요소로 모델링 하였다.

5.2 부유식 교량의 자유진동 해석

자유진동 해석 결과 부유식 교량의 고유진동수는 표 1에 나타내었으며, 이 중 처음 4개의 고유 모드 형상을 그림 5에 나타내었다. 이 그림에서 점선으로 표시된 원래의 형상을 기준으로 첫 번째 수평모드만이 같은 방향으로의 변위 형상을 보여주고 다른 모드들은 양방향의 변위 형상을 보여준다. 따라서, 파랑하중이 교량 길이에 걸쳐 같은 방향으로 작용한다면 다른 모드보다 첫 번째 모드 성분의 증폭 여부에 특히 주의를 하여야 한다

표 1 예제 교량의 자유진동 해석 결과

모드 번호	고유진동수 [rad/sec]	고유주기 [sec]	모드 형상
1	0.588	10.7	수평
2	0.960	6.55	수평
3	1.19	5.28	수직
4	1.20	5.23	수직
5	1.21	5.21	수직
6	1.25	5.01	수직
7	1.31	4.81	비틀림
8	1.43	4.41	수직

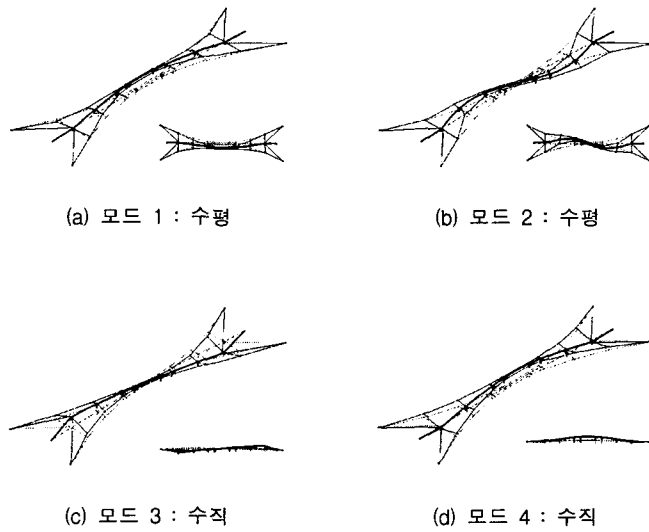


그림 5 예제 교량의 자유진동 모드

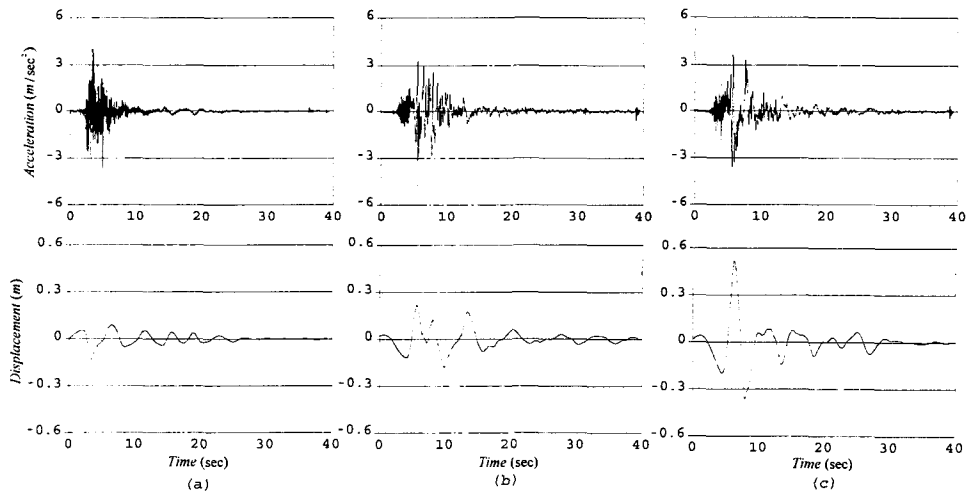


그림 6 입력지진 (a)수직 (b)수평(140도) (c)수평(230도) (상단 : 가속도 이력, 하단 : 변위 이력)

5.3 부유식 교량의 지진하중 응답 해석

해석에서 사용한 입력지진으로는 1979년 EI-Centro 지진기록 중 가속도가 가장 크다고 생각되는 Array No.5를 사용하였다(김호경 등, 1997). 그림 6에 입력지진의 3직각방향 가속도와 변위이력을 나타내었고, 지진의 크기는 6.6(M_L)로서 수정머켈리 진도(MM) VIII에 해당된다.

그림 7에 교량의 상부구조의 수평방향(y방향)과 수직방향(z방향)의 지진하중 응답을 절점 3, 8, 17에 대하여 도시하였다. 수평방향은 동시가진하는 경우가 다중지지를 고려한 경우보다 큰 응답이 발생하였고, 수직방향의 경우는 다중지지를 고려한 경우에 더 큰 응답이 발생하였다. 절점 17의 거동을 보면 지진하중보다 훨씬 저주파의 응답이 나옴을 확인할 수 있고, 지진하중이 가해지는 동안 구조물은 천이응답이 지배적이라고 판단된다.

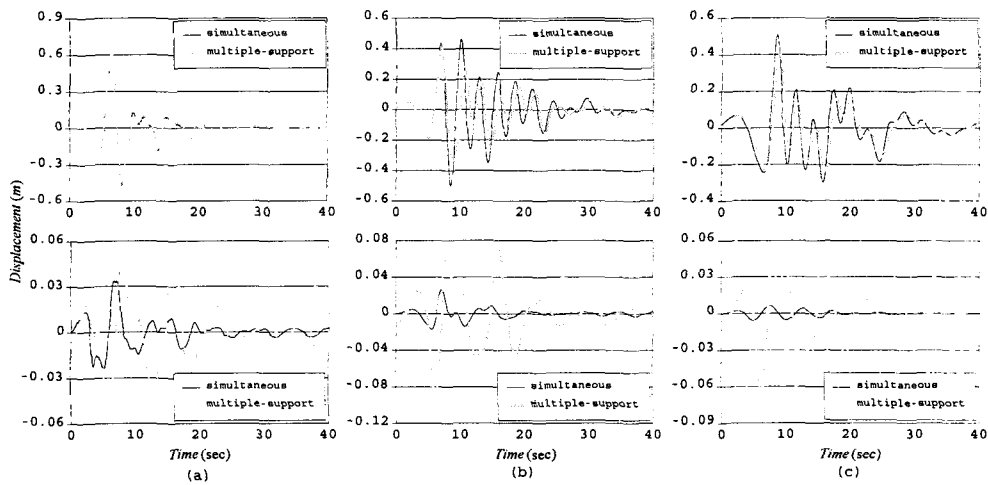


그림 7 변위 응답 (a) node 3 (b) node 8 (c) node 17

(상단 : 수평변위, 하단 : 수직변위, 다중지지 : 전단파속도 1200m/sec)

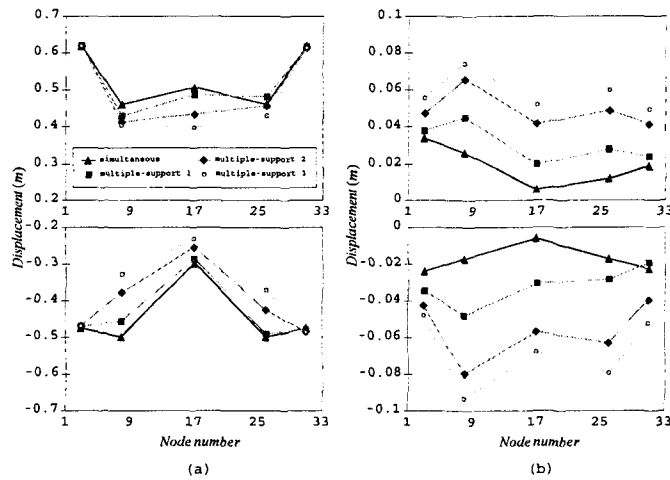


그림 8 변위의 다중지지 효과 (a) 수평방향 변위 (b) 수직방향 변위

(상단 : 최대값, 하단 : 최소값, 다중지지1·2·3 : 전단파속도 3000·1500·1200, m/sec)

그림 8을 통해서 다중지지 효과를 확인해 보았다. 수평방향의 경우는 지점부근에서 최대 응답이 발생하였고 다중지지 효과가 거의 의미없는 것으로 판단되며, 수직방향의 경우는 최대 응답이 지점과 중앙부 사이에서 발생하였고 다중지지의 효과가 상당히 고려할 필요가 있는 것으로 보인다.

그림 9에는 단면력중 모멘트의 다중지지 효과를 알아보았다. z방향과 y방향 모멘트 모두 지점과 중앙점 사이에서 최대값이 나왔으며 다중지지에 의한 영향은 크지 않다. 그림 10에는 케이블 장력의 다중지지 효과를 알아보았으며 다중지지를 고려하는 경우에 장력변화량의 크기가 동시가진 경우보다 상당히 큰 값을 보였다.

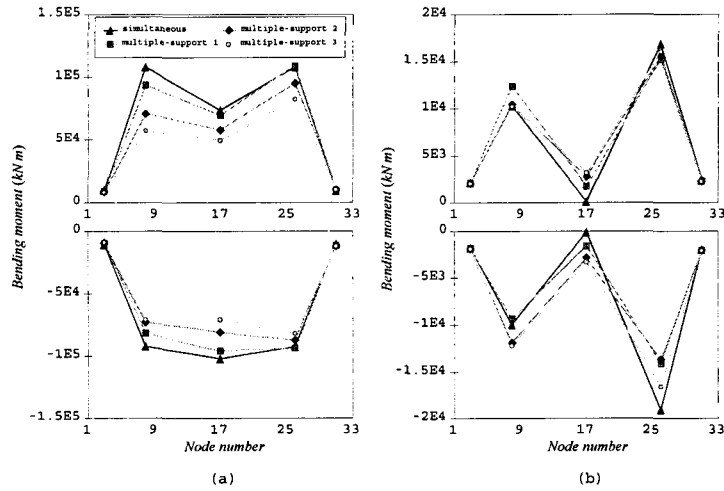


그림 9 휨모멘트의 다중지지 효과 (a) z방향 (b) y방향

(상단 : 최대값, 하단 : 최소값, 다중지지1·2·3 : 전단파속도 3000·1500·1200, m/sec)

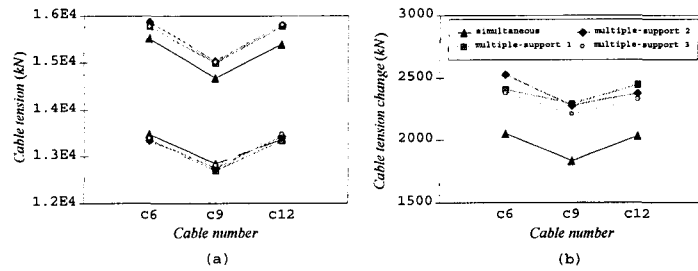


그림 10 케이블 장력의 다중지지 효과 (a) 수평 장력 (b) 수평장력 변화량

(다중지지1·2·3 : 전단파속도 3000·1500·1200, m/sec)

6. 결론

다중지지 지진입력에 대한 이산 폰툰형 부유식 교량의 동적 응답 해석을 시간영역에서 수행하였다. 부유식 교량의 상부구조는 공간뼈대요소와 탄성현수선 요소를 이용하여 모델링하였다. 폰툰

의 동수력계수는 3차원 유체장해석을 통하여 산정하였고, 동수력계수의 주파수 의존성을 고려하기 위하여 시간지연함수를 사용하였다.

연구에서 사용한 부유식 교량은 첫 번째 고유주기가 10.7초로서 일반적인 교량에 비하여 비교적 장주기의 특성을 가지고 있어 천이응답이 비교적 오래 지속되며, 특히 부유식 교량의 지진하중에 대한 응답을 구하는 경우 최대 응답성분 중 천이응답이 차지하는 비중이 상당히 중요하다고 판단되므로 정상상태의 응답성분만을 구할 수 있는 주파수영역해석 보다는 시간영역해석이 바람직한 것으로 생각된다. 전지점에 동시에 가진되는 지진입력과 비교하여 이 연구에서 사용한 형상변화를 고려하지 않은 다중지지 지진입력의 효과는 크지 않은 것으로 보인다. 하지만, 케이블 장력의 경우는 다중지지 지진입력에 의해서 더 큰 값을 가졌고 장력의 변화도 상대적으로 컸다.

추후 연구과제로서 부유식 교량의 지진하중에 대한 엄밀한 해석을 위하여 지반-구조물 상호작용과 다중지지 지진입력의 추계학적 특성을 고려할 필요가 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문의 일부는 서울대학교 지진공학연구센터의 지원 하에 수행된 연구 결과로서, 연구지원에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Solland, G., Haugland, S. and Gustavsen J. H., "The Bergsoysund Floating Bridge", Norway, Structural Engineering International, March, 1993, pp.142-144.
2. Lwin, M. M., "The Lacey V. Murrow Floating Bridge", USA, Structural Engineering International, March, 1993, pp. 145-148.
3. Hartz, B. J., "Dynamic Response of the Hood Canal Floating Bridge", ASCE/EMD Specialty Conference on Dynamic Response of Structures, Atlanta, Ga., 1981, pp. 16-28.
4. 백인열, 권장섭, 이원표, 장승필, "이산 폰텐형 부유식 교량의 동적 해석, 대한토목학회", 제22권, 제2-A호, 2002, pp.327-336.
5. 김호경, 서정인, "다중지지된 자정식 현수교의 비선형 지진응답 해석", 한국지진공학회 논문집, 제1권 제3호, 1997, pp.45-58.
6. 현대건설 기술연구소, "현수교의 시공 단계 해석 시스템 개발", 93STR09, 1994.
7. 장승필, 박정일, "비선형 케이블 유한요소에 관한 연구", 한국해안·해양공학회지, 제1권, 제1호, 1989, pp.93-101.
8. Newman, J. N., "Marine Hydrodynamics", The MIT Press, 1986.
9. Chang, S. P., Park, J. I. and Kim, J. K., "A Dynamic Analysis of Tension Leg Platform using the General Curved Boundary Element", Proceedings of the Second International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco USA, v.1, 1992, pp. 228-234.
10. Cummins, W. E., "The impulse response function and ship motions", David Taylor Model Basin, Report 1661, Washington D.C., 1962.