

섬유요소를 이용한 교량의 비선형 지진응답해석

Earthquake Response Analysis of Bridges Using Fiber Element Method

변 순 주* / 임 정 순**
Byun, Soon-Joo / Im, Jung-Soon

Abstract

Fiber element method in earthquake response analysis of bridges is used to represent a realistic flexural deformation according to nonlinear behavior of beam-column section. Nonlinear pseudo-static analysis of two column bent using fiber element is accomplished and failure mechanism of the plastic hinge region is studied. Load-displacement curve obtained by nonlinear pseudo-static analysis can be applicable to earthquake response analysis by capacity spectrum method. The nonlinear time history analysis of a full bridge model using fiber element experienced by the ground motion corresponding to the target response spectrum is accomplished. The result of time history analysis is similar to that of capacity spectrum method.

key words : fiber element, earthquake response, capacity spectrum method, time history analysis

요 지

교량의 지진응답해석시 단면의 비선형 거동특성에 따른 휨변형을 정밀하게 구현하기 위해 섬유요소를 이용한 해석이 수행되었다. 2주형 다주교각을 섬유요소로 모델링하여 지진하중에 대한 비선형 정적해석을 수행하였으며 소성힌지 영역에서의 파괴 메커니즘을 분석하였다. 비선형 정적해석으로 얻어진 하중-변위 곡선을 이용하여 역량스펙트럼 방법에 의한 지진응답해석을 수행되었다. 또한 교량 전체 시스템을 섬유요소를 이용하여 모델링하고 동일한 응답스펙트럼을 가지는 지진파를 입력하여 비선형 시간이력 해석을 수행되었으며 이는 역량스펙트럼 방법과 유사한 결과를 보인다.

핵심용어 : 섬유요소, 지진응답, 역량스펙트럼 방법, 시간이력 해석

1. 서 론

교량의 교각이나 건축물의 기둥과 같은 부재는 상시에는 상부구조의 수직하중을 견디도록 설계되어 있으며 이 경우 대개 탄성상태 내에서 거동을 한다. 그러나 지진하중과 같은 빈도가 낮은 큰 수평방향 하중이 작용할 경우에는 큰 비선형 거동을 보이게 되며, 경제적이고 안전한 설계를 위해서는 이러한 비선형

효과를 정밀하게 고려할 필요가 있다. 이 경우 지진하중에 의해 교각 기둥은 휨모멘트를 받게 되며 철근콘크리트 부재일 경우에는 휨에 의한 비선형 거동이 복잡하게 나타나기 때문에 이에 맞는 해석 기법을 사용하여야 한다. 휨거동을 하는 기둥의 비선형성을 고려하는 방법중 하나는 탄성거동이 예상되는 부분은 뼈대요소로 모델링하고 모멘트가 크게 작용하는 소성힌지 영역은 단면의 모멘트-곡률 관계를 적용한 비선형 회전 스프링으로 모델링하는 것이다. 그러나 실제로

* 정회원 · (주)알파에스스트럭처 기술연구소 소장 (e-mail : head@rps-structure.co.kr)
** 정회원 · 경기대학교 토목공학과 정교수

소성인지 영역은 기둥 축방향으로 분포되어 있기 때문에 정확한 해석은 어렵다. 정밀한 해석을 위한 방법은 기둥을 3차원 솔리드 요소를 이용한 유한요소해석을 수행하는 것이다. 그러나 이는 콘크리트 재료의 비선형성이 크기 때문에 소성변형을 보이는 단면에서는 요소를 매우 잘게 분할해야하고 지진파 입력을 통한 시간이력해석시 많은 계산량을 요구한다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 Spacone(1996) 등은 섬유요소를 이용한 보요소의 휨해석 기법을 연구하였다. 섬유 요소는 간단한 모델링을 통하여 단면에서의 비선형 휨 거동을 정확히 표현할 수 있으며 전체적으로는 보요소로 구성되기 때문에 빠른 해석이 가능하다. 이 연구에서는 섬유요소를 이용하여 교각 기둥을 모델링하였으며, 이를 통하여 지진하중에 철근콘크리트 교각의 비선형 거동 및 파괴 메카니즘을 확인하였다. 그리고 3경간 교량의 전체 시스템에 대하여 비선형 시간이력 지진해석을 수행하였다.

2. 섬유요소를 이용한 기둥의 휨거동 해석

교량이 지진하중을 받으면 상부구조의 관성력이 수평방향으로 교각 기둥과 기초, 받침 등에 크게 작용한다. 이 경우 일반적으로 기초는 상대적으로 강성이 크고 받침 등은 강재로 되어있어서 피해가 적지만 교각에서는 큰 손상을 받게 된다. 그러므로 지진해석시 교각 기둥은 실제 거동을 정확히 모사할 수 있도록 모델링 되어야 한다. 섬유요소를 이용한 유한요소 모델링은 수평방향 하중을 받는 기둥과 같이 휨거동을 나타내는데 매우 효율적이며 비교적 정확한 비선형 해석을 수행할 수 있다.

섬유요소는 중립축에 수직인 단면은 변형 후에도 평면을 유지하며 수직하다는 베르누이 보 이론을 기초로 한다. 그림 1과 같이 단면을 n개의 섬유로 분할하고 i 번째 섬유의 x-z 평면에서의 좌표를 (x, y_i, z_i) 라 하면, x에서의 단면모멘트는 식 (1a) 및 식 (1b)와 같이 섬유들의 좌표축에서의 거리와 응력(σ_i) 및 면적(A_i)의 곱의 합으로 구해진다. 그러므로 섬유요소의 재료에 따른 일축방향 변형도-응력 곡선이 표현되면 단면의 모멘트-곡률 관계를 정확히 모사할 수 있다.

$$M_y(x) = \sum_{i=1}^n z_i \sigma_i(x) A_i \quad (1a)$$

$$M_z(x) = \sum_{i=1}^n y_i \sigma_i(x) A_i \quad (1b)$$

부재의 휨거동은 적분점에서 구한 단면의 모멘트-곡률관계를 수치적분을 통하여 산출되며 비선형 해석이므로 그림 2와 같이 각각의 단면에서의 수치 적분의 수렴 여부와 부재력의 수렴 및 전체 구조물의 수렴 여부를 만족시킬 때까지 각각의 서브루틴에서 반복 계산이 수행된다.

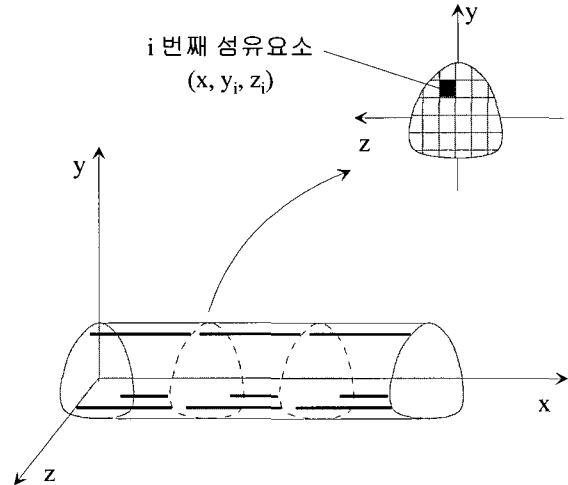


그림 1. 섬유요소의 구성

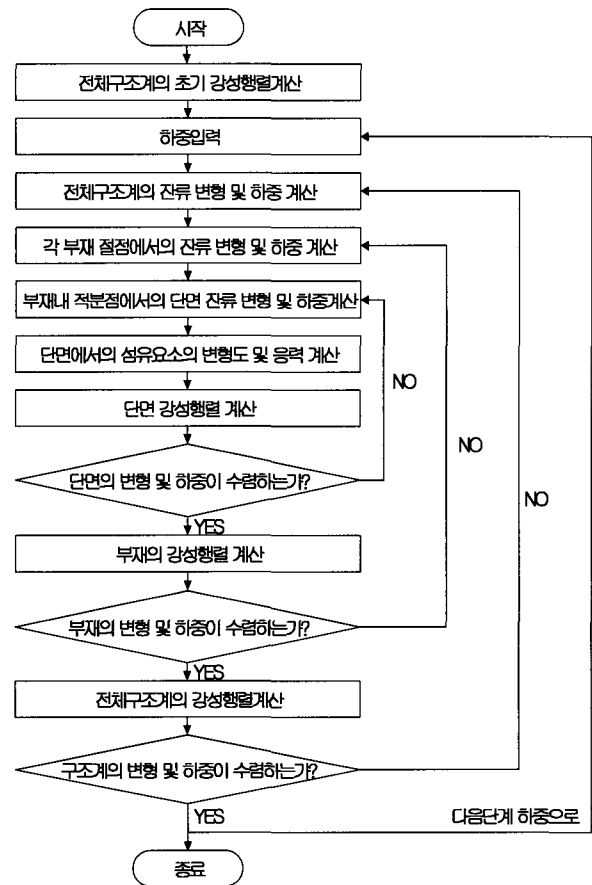


그림 2. 섬유요소를 이용한 FEM 해석 개요

3. 해석 대상 교량

3.1 해석 대상 교량의 제원

이 연구에서 지진해석을 수행한 교량은 그림 3의 종단면도와 같이 총연장 130m이고 경간장이 각각 40m, 50m, 40m 인 3경간 연속교이며, 첫 번째 교각에서는 고정단으로 되어있지만 두 번째 교각과 교대에는 이동단 받침으로 되어있다. 그림 4는 상부구조와 교각의 횡단면도이다. 상부구조는 강박스교로 되어있으며 단위길이당 중량은 221.7kN/m이다. 교각은 2주형 다주교각이며 기둥의 단면은 지름이 2m 인 원형 단면이고 기둥의 순높이는 12m, 캡빔의 높이는 3m이다.

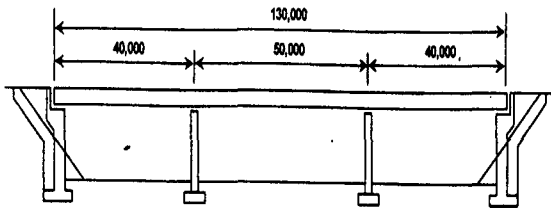


그림 3. 교량의 종단면도

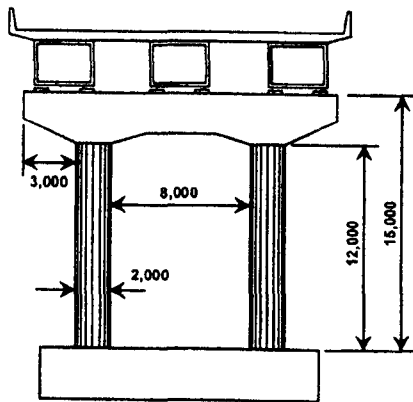


그림 4. 교량의 횡단면도

3.2 섬유요소를 이용한 해석 대상 교량의 모델링

해석에 사용된 교량은 섬유요소로 모델링되었으며, 해석프로그램은 FORUM8에서 개발된 UC-win/FORUM(3D)이 사용되었다. 기둥은 6개의 뼈대요소로 나누었으며 각각의 길이는 그림 5와 같이 소성변형이 크게 발생할 것으로 예상되는 상·하단은 높이 1m로, 그 다음은 2m, 가운데는 3m로 하였다. 상부구조 하중은 구조해석을 통해서 얻어진 11,345kN을 캡빔 상단의 받침 위치에 분포시켰다.

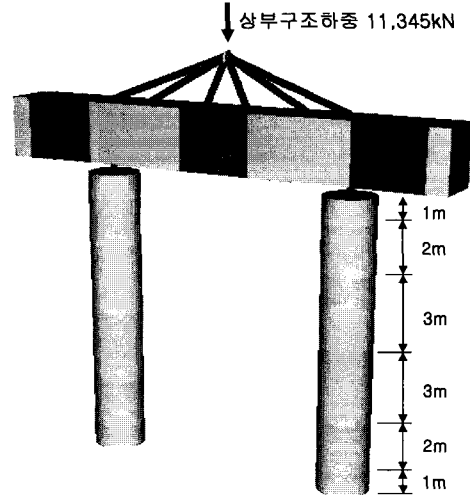


그림 5. 교각의 모델링

단면은 심부구속 콘크리트 부분은 가로, 세로 각각 20등분하고 피복콘크리트 역시 20등분으로 섬유요소를 나누었으며 지름 32mm 철근 48개를 배치하여 철근비가 1.2%가 되도록 하였다. 각각의 섬유요소에 대한 축방향 응력-변형도 모델은 그림 6과 같다. 철근은 인장 하중에 대해서는 bi-linear 모델로 하였고 압축하중에 대해서는 좌굴에 의한 응력감소를 고려하기 위하여 tri-linear 모델로 하였다. 피복콘크리트는 횡방향 구속철근의 영향이 없기 때문에 비구속콘크리트 모델을 사용하였고 심부구속콘크리트는 횡구속 철근비를 0.9%로 하여 일본도로교시방서(일본도로협회, 2002)의 내진설계편에 제시된 응력-변형률 모델이 이용되었다.

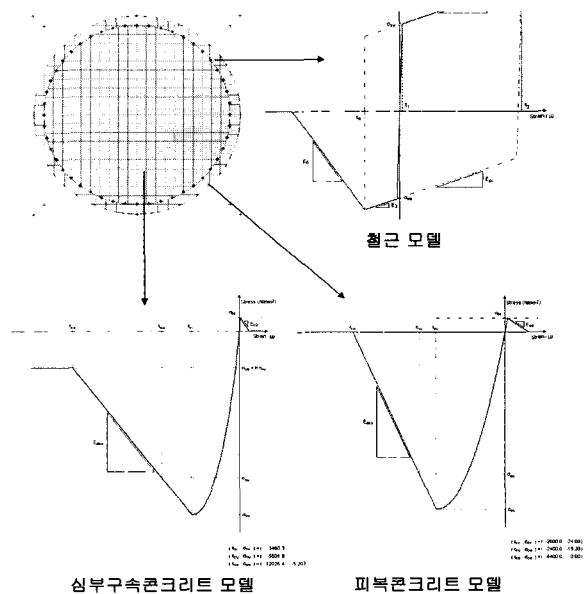


그림 6. 단면의 섬유요소 모델링

4. 정적해석을 통한 교각의 지진응답해석

4.1 교축방향 하중-변위 곡선 해석

그림 7은 교축방향으로 변위를 증가시키며 얻은 교각의 하중-변위 곡선이다. 상부 변위가 19mm에서 기동 하단의 단면에서 인장에 의한 콘크리트 균열이 발생하여 부재가 1차적인 비선형 거동을 나타내기 시작했다, 변위 103mm에서 인장측 최외곽 철근이 항복하면서 2차적인 비선형 거동 특성이 나타난다. 이후 181mm에서 압축측의 피복 콘크리트가 극한변형에 이르면서 강성이 저하되기 시작하며 이후에도 상당한 변위까지 하중을 견디다가 263mm 변위에서 심부구속 콘크리트의 압축부분이 극한변형에 도달하게 된다. 부재의 항복은 인장측 철근의 항복과 피복 콘크리트의 압축파괴 사이인 116mm이고 부재의 극한변위는 481mm로 연성도는 4.15로 평가되었다.

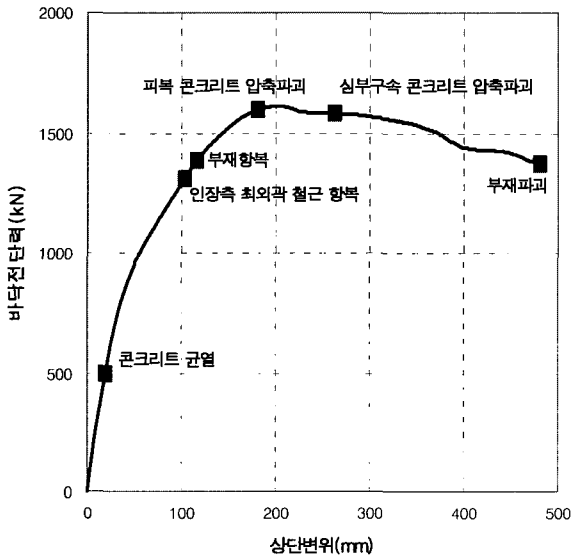


그림 7. 교축방향 파괴 메카니즘

4.2 교축직각방향 하중-변위 곡선 해석

그림 8은 교축직각방향으로 변위를 증가시키며 얻은 교각의 하중-변위 곡선이다. 교축직각방향의 경우 기동의 상·하단이 모두 소성 변형을 일으키며 수평방향 하중에 의해 두 기동의 축력이 달라진다. 콘크리트의 균열은 변위 5mm일 때 축력이 약한 기둥에서 먼저 발생하며 철근의 항복도 동일한 기둥에서 변위 29mm일때 발생하였다. 피복콘크리트 압축파괴는 변위 54mm에서 축력이 강한 기둥에서 발생하며 변위 95mm에서 심부구속콘크리트가 극한변형에 이른다. 부재의 항복변위는 36mm이고 부재의 극한변위는 263mm로 연성도는 7.3으로 평가되었다.

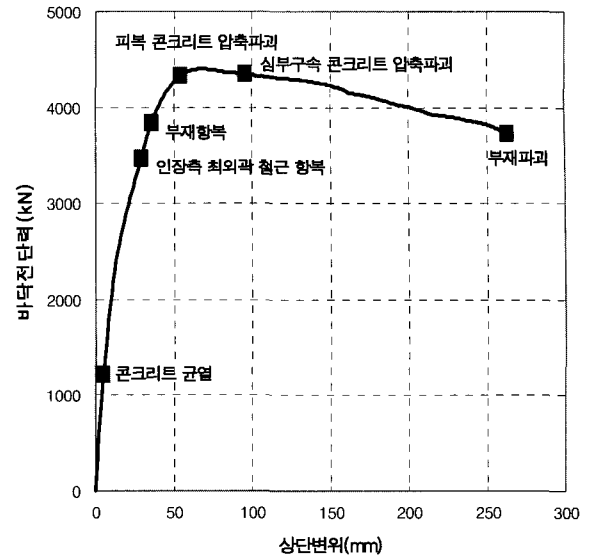


그림 8. 교축직각방향 파괴 메카니즘

4.3 역량스펙트럼을 이용한 역량스펙트럼 지진응답해석

섬유요소를 이용한 해석을 통하여 얻어진 교각의 교축방향 및 교축직각방향 하중-변위 곡선을 통하여 역량스펙트럼 방법을 이용한 지진응답해석을 수행하였다. 지반운동은 도로교설계기준(2005)의 지진구역 I, 재현주기 1,000년, 지반종류 II에 대한 응답스펙트럼을 사용하였다.

교축방향으로는 하나의 교각에만 고정되어있기 때문에 상부구조 전체의 관성력이 고정단 교각에만 가해지며 이때 유효중량은 상부구조 전체 중량 및 캡빔의 자중, 기둥 자중의 1/2을 더하여 31,564kN으로 하였다. 교축직각방향으로는 모든 교각 및 교대에 대하여 고정되어있기 때문에 교각 하나에 작용하는 상부구조의 관성력은 교각을 중심으로 양쪽 지간의 가운데까지의 질량이 걸린다고 가정하고 마찬가지로 이에 캡빔의 자중 및 기둥 자중의 1/2를 더하면 12,714kN이 유효하중이 된다.

역량스펙트럼 방법에서 감쇠에 의한 스펙트럼 감소계수는 ATC(1996)에서 제시된 값을 사용하였으며, 반복계산을 통하여 성능점을 구하였다. 그 결과 그림 9와 같이 교축방향으로는 응답변위가 항복이후 피복 콘크리트가 파괴되는 변위에 가까운 185mm로 계산되었으며 이때의 응답하중은 1,601kN이다. 교축직각방향으로는 그림 10과 같이 인장측 콘크리트의 균열이 발생한 이후지만 부재가 항복하기 이전인 19.3mm에서 응답변위가 발생하였으며 이때의 응답하중은 2,846kN이다.

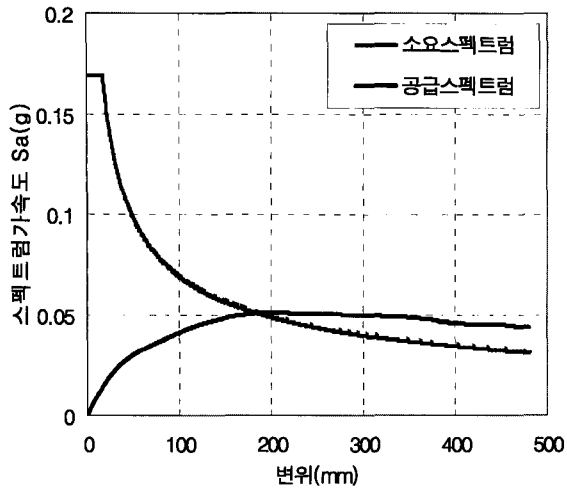


그림 9. 교축방향 지진하중에 대한 역량스펙트럼 지진응답해석

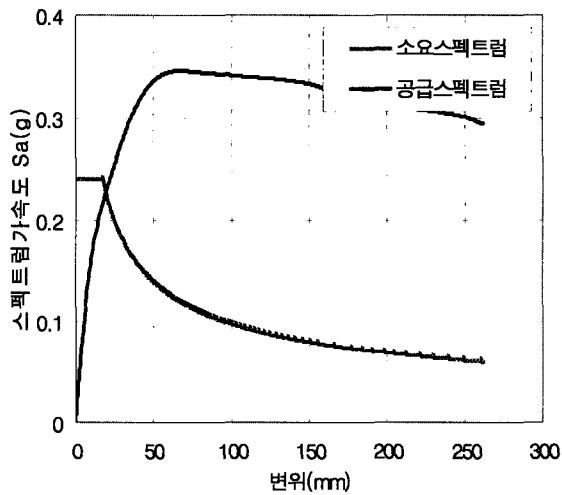


그림 10. 교축직각방향 지진하중에 대한 역량스펙트럼 지진응답해석

5. 동적해석을 통한 교량의 시간이력 지진응답해석

5.1 전체 교량시스템의 모델링

섬유요소는 정확한 비선형 해석을 수행할 수 있으면서 비교적 해석에 소요되는 시간이 적다. 그러므로 실제 설계지진의 지진파를 입력하여 시간이력해석을 통해 교량의 응답변위와 응답하중을 직접 구하기가 용이하다. 시간이력해석을 위하여 교량 전체시스템을 그림 11과 같이 모델링하였다. 교각은 동일한 섬유요소로 모델링을 하였으며 상부구조는 수직하중에 대한 단면 2차모멘트는 1.604m^4 이고, 수평하중에 대한 단

면 2차모멘트는 33.760m^4 이며, 탄성 뼈대요소로 모델링 하였다.

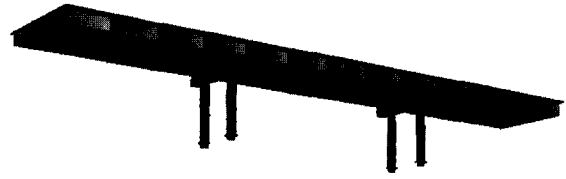


그림 11. 교량시스템의 모델링

5.2 지진파 생성

해석에 사용된 지진파는 앞서 도로교설계기준에 따른 응답스펙트럼에 맞추어 SIMQKE를 사용하여 추계학적으로 생성하였다. 시간이력의 포락함수는 사다리꼴로 하였고 포락함수의 매개변수는 ASCE(1998)에서 제안한 규모 6.0~6.5 구간을 적용하여 상승시간은 1.0초, 강진동의 지속시간은 7.0초 감쇠시간은 5.0초로 결정하였다(그림 12). 생성된 지진파의 응답스펙트럼과 목표하는 도로교설계기준에 따른 응답스펙트럼은 그림 13에 도시하였다.

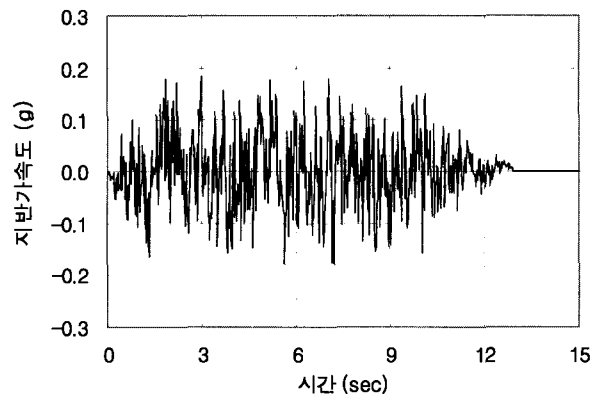


그림 12. 생성된 지진파의 가속도 시간이력

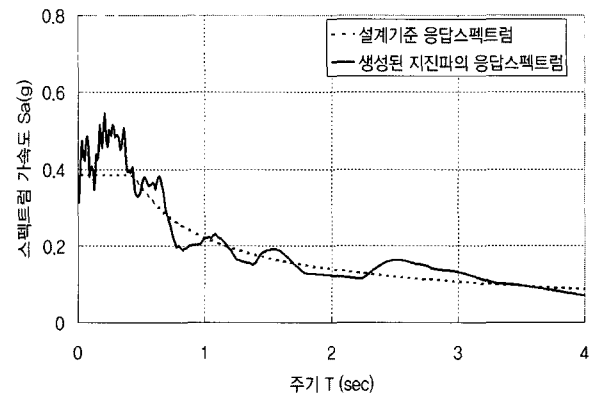


그림 13. 생성된 지진파의 응답스펙트럼

5.3 지진응답 시간이력해석 결과

그림 14는 교축방향의 최대변형형상이다. 고정단인 왼쪽 교각에서만 변형이 발생하며 교각의 강성도 작고 상부구조의 관성력도 크게 작용하기 때문에 그림 15에서와 같이 주기가 매우 길게 나타난다. 해석결과 상부구조의 종방향 최대 변위는 3.3초에서 245mm가 발생하였으며 교각하단의 최대 바닥전단력은 1,678kN이다. 교축방향의 경우 항복 이후까지 변형이 생기기 때문에 그림 16과 같이 하중-변위 이력곡선이 큰 면적을 형성한다.

교축직각방향으로는 양쪽 교각에 모두 고정이 되어 있고 교대에서의 변위는 발생하지 않기 때문에 그림 17과 같이 상부구조가 포물선 모양으로 거동한다. 교축직각방향으로 해석한 결과는 상부구조의 횡방향 최대 변위는 9.1초에서 17.1mm가 발생하였으며 교각하단의 최대 바닥전단력은 2,746kN이다. 그림 18에서와 같이 교축직각방향으로는 교각의 강성이 크고 교각 하나에 작용하는 관성력도 작기 때문에 주기가 매우 짧으며 하중-변위 곡선을 그려보면 그림 19와 같이 거의 탄성상태 내에서 거동하고 하중-변위 이력면적이 작다.

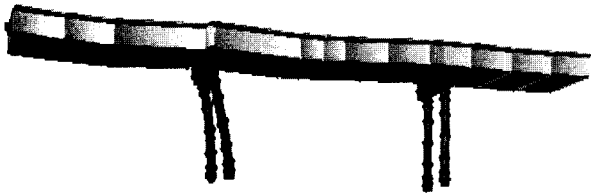


그림 14. 교축방향 가진시 최대변형형상

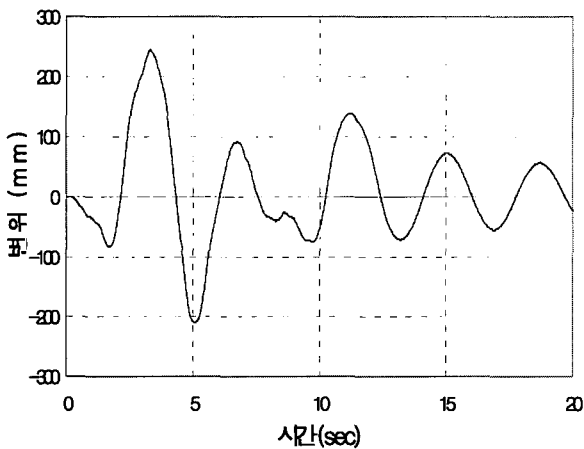


그림 15. 교축방향 가진시 상부구조의 변위 시간이력

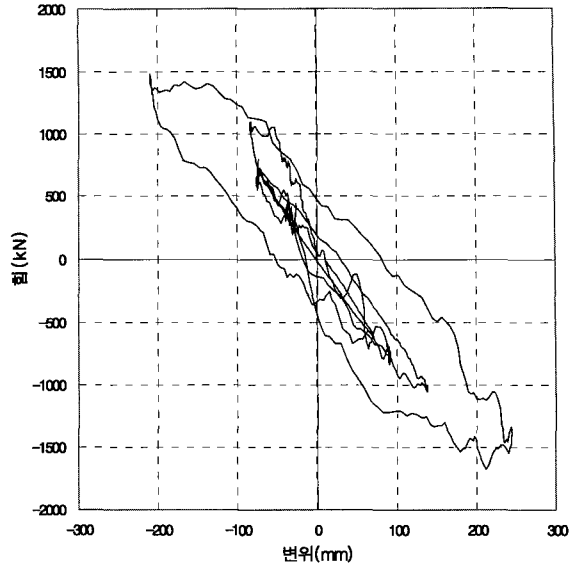


그림 16. 교축방향 가진시 바닥전단력-상부구조변위 곡선



그림 17. 교축직각방향 가진시 최대변형형상

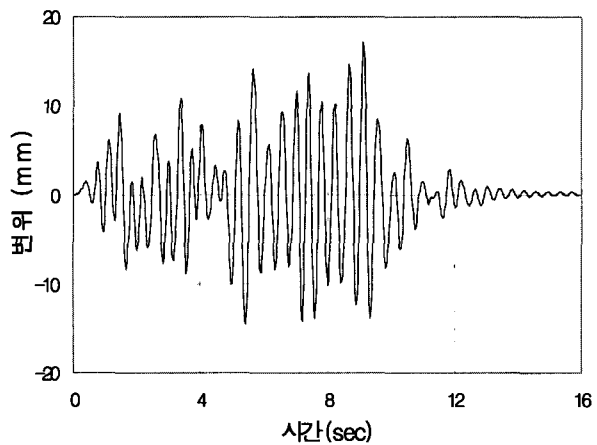


그림 18. 교축직각방향 가진시 상부구조의 변위 시간이력

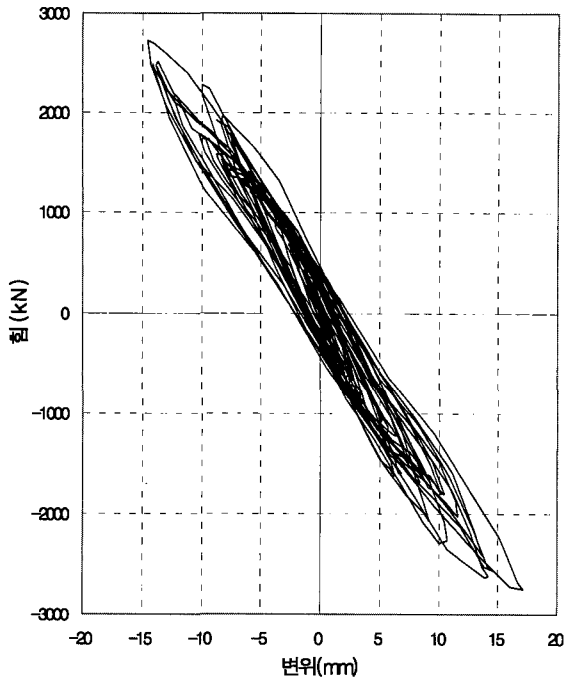


그림 19. 교축직각방향 가진시 바닥전단력-상부구조변위 곡선

표 1은 역량스펙트럼 방법과 시간이력해석방법을 비교한 것이다. 역량스펙트럼 방법의 경우 교각 전체의 응답하중이 구해지므로 전단력과 모멘트는 두 기동에 대한 값의 합이다. 역량스펙트럼 방법과 시간이력해석 방법 모두 비선형 거동을 고려하기 때문에 변위와 하중을 보다 정확히 구할 수 있으며 섬유요소를 사용하는 해석은 정적해석과 동적해석 모두 비선형 거동을 정확히 묘사할 수 있기 때문에 두 방법에 의한 차이는 크지 않다.

표 1. 해석 방법에 따른 지진응답 비교

구 분		역량스펙트럼 방법	시간이력해석 방법
교축 방향	상부구조변위	184mm	245mm
	전단력	1,601kN	1,678kN
교축직각 방향	상부구조변위	19.3mm	17.1mm
	전단력	2,846kN	2,746kN

6. 결 론

섬유요소를 이용하면 비선형 휨거동을 정확하고 간단하게 모델링할 수 있기 때문에 지진응답 해석시 매우 용이하게 적용될 수 있다. 섬유요소 모델에서는 단면을 여러 개의 섬유로 분할하고 그에 맞는 재료특성을 입력할 수 있으므로 콘크리트의 단면에서의 파괴 메카니즘을 정확히 알 수 있으며 이는 지진하중에 의한 구조물의 손상상태를 예측하는데 큰 도움이 된다. 또한 구조계 전체를 모델링하여 시간이력 해석을 수행하기에 적합하므로 지진하중에 의한 비선형 정밀해석이 필요한 경우 용이하게 이용될 수 있다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2005). 도로교설계기준, 한국도로교통협회
- 일본도로협회 (2002). 도로교시방서·동해설-내진설계편, 일본도로협회
- ASCE (1998). Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary, ASCE Standard 4-98, New York, USA.
- ATC (1996). Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California, USA.
- Spacone, E., Filippou, F. C. and Taucer, F. F (1996). Fibre Beam-Column Model for Nonlinear Analysis of R/C Frames: Part I. Formulation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 25, pp. 711-725.

- © 논문접수일 : 2006년 09월 01일
- © 심사의뢰일 : 2006년 09월 04일
- © 심사완료일 : 2006년 09월 25일

