

섬유요소를 이용한 교량의 3차원 지진해석 3D Nonlinear Seismic Analysis of a Bridge Using Fiber Element

조정래*, 각임종**, 조창백*, 김병석***, 김영진**

Cho, Jeong-Rae · Kwahk, Imjong · Cho, Chang Beck · Kim, Byeong-Seok · Kim, Young-Jin

Abstract

In the present design concept, the nonlinear behavior of bridges is allowed under large earthquake. Therefore, demands for nonlinear analyses of bridges are increased more and more especially in the area of seismic assessment. It is, however, difficult to solve the problem how the nonlinearity of columns should be modelled. In this study, the fiber element is adopted for modelling pier column. The element is a kind of structural elements like frame element, and it can model the distributed plasticity of plastic hinge. A 3 span continuous bridge is taken for seismic analysis. First, the nonlinear static analysis the column at fixed support are performed so that the characteristics of column is investigated. Second, the nonlinear dynamic analyses of the full bridge model is performed, considering 3 directional earthquake excitations.

Keywords : Pier column, fiber element, distributed plasticity, plastic hinge, nonlinear dynamic analysis

1. 서론

현재의 내진설계 개념은 큰 지진시 경제성을 고려하여 교량에 어느 정도 비선형 거동을 허용하고 있으며, 특히 내진성능평가 분야에 있어서 비선형 해석에 대한 수요가 점점 커지고 있다. 교량의 비선형 해석시 가장 문제가 되는 것은 교각의 비선형 거동을 모델링하는 것이다. 이 연구에서는 교각의 모델링을 위해 일종의 비선형 뼈대요소인 섬유요소(fiber element)를 도입하였다. Spacone, Filippou, Taucer 등이 제안한 섬유요소는 유연도법에 기초하고 있으며, 소성힌지가 부재 축방향으로 확대되는 현상을 합리적으로 모델링할 수 있는 분산소성모델(distributed plasticity model)이다. 이 연구에서는 3경간 연속교량을 채택하여 비선형 3차원 지진해석시 섬유요소의 적용성을 검토하였다. 먼저 기둥을 섬유요소로 모델링하여 정해석을 수행하여 기둥특성을 파악하였다. 두 번째로 세 방향의 지진성분을 모두 고려하여 교량의 3차원 비선형 지진해석을 수행하였다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원

*** 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

2. 섬유요소

섬유요소는 일종의 뼈대요소로 유연도법(flexibility method)에 기초하며 분산소성을 모델링할 수 있는 비선형 요소이다(그림 1참조).^(2,3,4,9) 섬유요소는 단면을 잘게 분할한 섬유(fiber)에 대해 각각 정확한 응력-변형도 관계를 추적하기 때문에 적절한 응력-변형도 관계를 사용할 경우 정밀한 해석결과를 도출할 수 있다. 이 연구에서는 콘크리트 재료모델로 Mander 등이 제안한 콘크리트 모델을 사용하였고,⁽⁶⁾ 철근의 응력-변형도 관계는 bilinear model을 사용하였다.

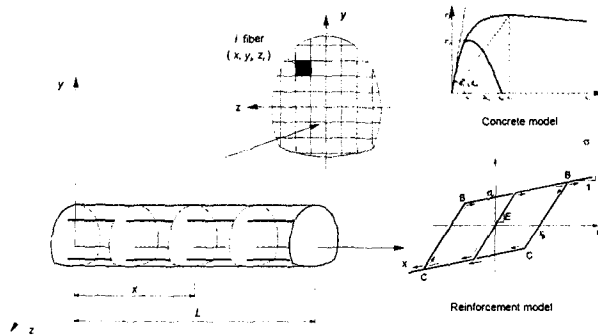


그림 1. 섬유요소 개요

3. 해석 예제

섬유요소를 이용하여 그림 2와 같은 3경간 연속교량⁽⁷⁾의 지진해석을 수행한다. 콘크리트는 $f_{ck} = 240 \text{ kgf/cm}^2$, $E_c = 2.32 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$, 철근은 SD40이고 $f_y = 4,000 \text{ kgf/cm}^2$, $E_s = 2.32 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 이다.

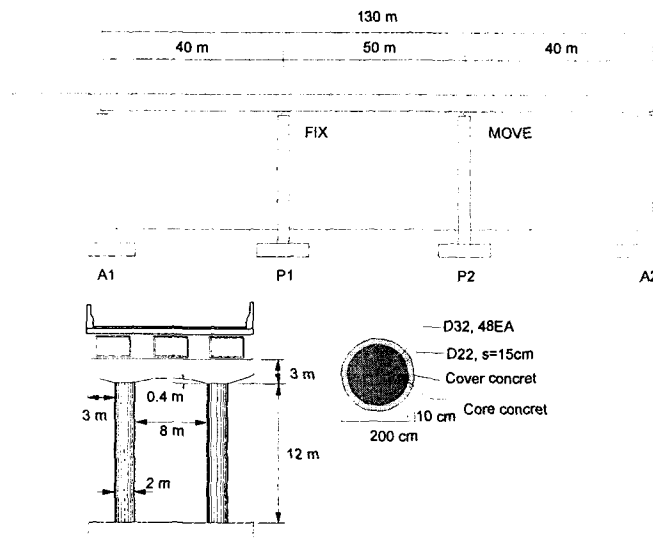


그림 2. 예제 교량 : 3경간 연속 교량

3.1 정해석 : 기둥특성 분석

PI의 좌측기둥을 대상으로 그림 3과 같은 정해석을 수행하였다. 기둥은 섬유요소로 모델링하였다. 철근, 구속콘크리트, 비구속뿔개콘크리트 부분으로 나누어 총 354개의 섬유로 요소를 구성하였다. 상부구조 및 캡빔 등에 의한 축력은 730 ton이다. 해석절차는 먼저 축력을 가한 후 수평방향에 대해 변위제어에 의해 교각이 파괴될 때 까지 해석한 것이다. 교각파괴의 기준은 철근이나 심부구속콘크리트가 극한 변형률(각각 0.12, 0.01)에 도달할 때를 기준으로 하였는데, 본 해석에는 심부구속콘크리트의 파괴로 해석이 멈추었다. 그림 3에서 횡방향 하중-변위 곡선, 소성힌지가 발생하는 기초부의 단면 모멘트-단면곡률 곡선, 철근의 응력-변형도 곡선, 뿔개콘크리트 및 심부구속콘크리트의 응력-변형도 곡선을 나타내고 있다. 먼저 최외곽 철근이 항복하고, 콘크리트 뿔개부의 스폐링(spawling)이 일어났으며 최종적으로 최외곽의 심부구속철근이 극한변형도에 도달하여 기둥이 파괴되었음을 확인할 수 있다.

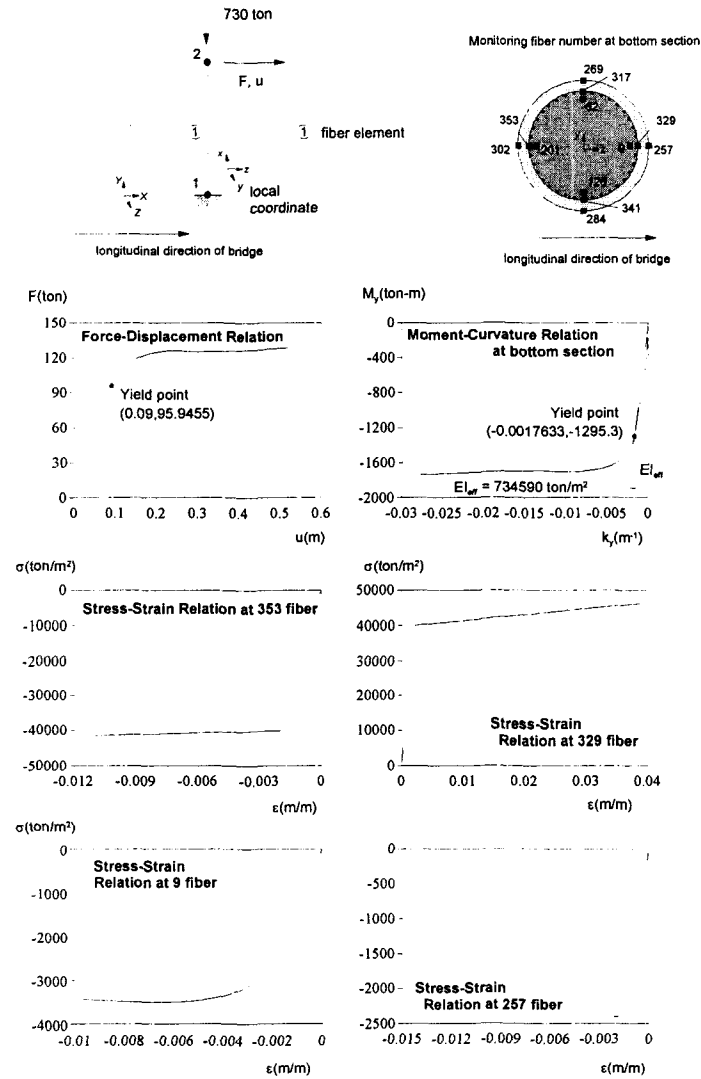


그림 3. 기둥의 정해석 모델 및 해석결과

3.2 3차원 비선형 시간이력 해석

전체 교량에 대한 3차원 지진해석을 수행하였다. 그림 4와 같이 상부 슬래브 및 캡빔은 선형 뼈대 요소로 모델링하였고, 교각은 섬유요소로 모델링하였으며, 집중질량이 사용되었다. 교각과 상부 슬래브를 연결하는 교좌장치는 구속조건을 부과하였다. 동해석시 사용된 지반입력은 1940년 El Centro 지진(IMPERIAL VALLEY 5/19/40 0439, EL CENTRO ARRAY #9)⁽⁸⁾로 최대가속도계수 0.313g를 국내 설계기준인 0.154g로 맞추어 사용하였다. 그림 5는 사용된 지반입력의 교축방향, 교축직각방향, 수직방향 가속도 성분을 나타내고 있다. 해석 절차는 상부구조의 자중에 의한 정해석을 먼저 실시한 후 연속해서 시간이력해석을 수행하였다.

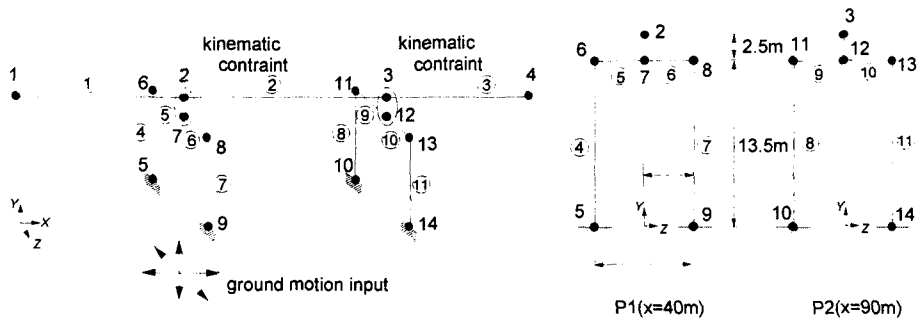


그림 4. 3차원 해석 모델

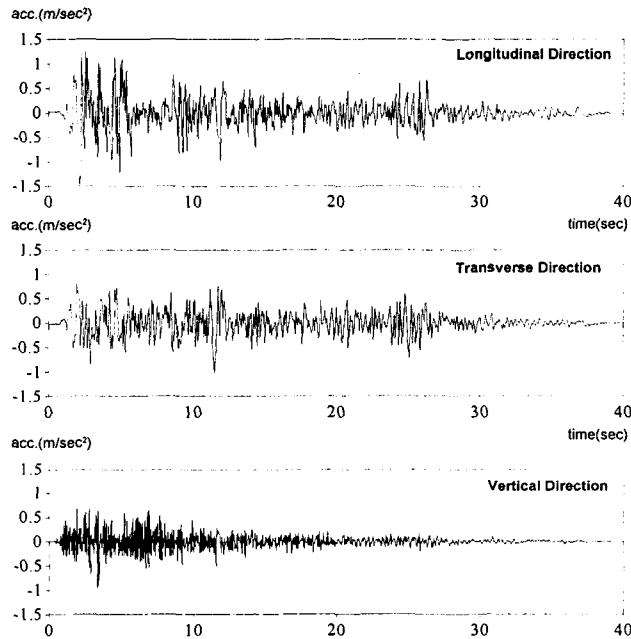


그림 5. 지반입력

그림 6과 7은 고정단 교각 하단부의 내력 모멘트와 상단부 상대운동의 응답이력을 각각 나타낸 것이다. 현재의 지진수준에서는 최외각 철근의 항복을 기준으로 한 항복하중($M_y = 1295.3 \text{ ton}$)에 도달하지 않음을 알 수 있다.

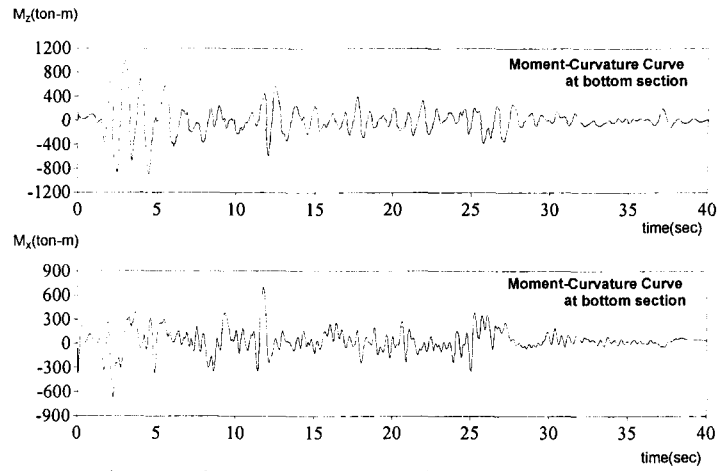


그림 6. 고정단 교각 하단부의 내력 모멘트 응답 이력

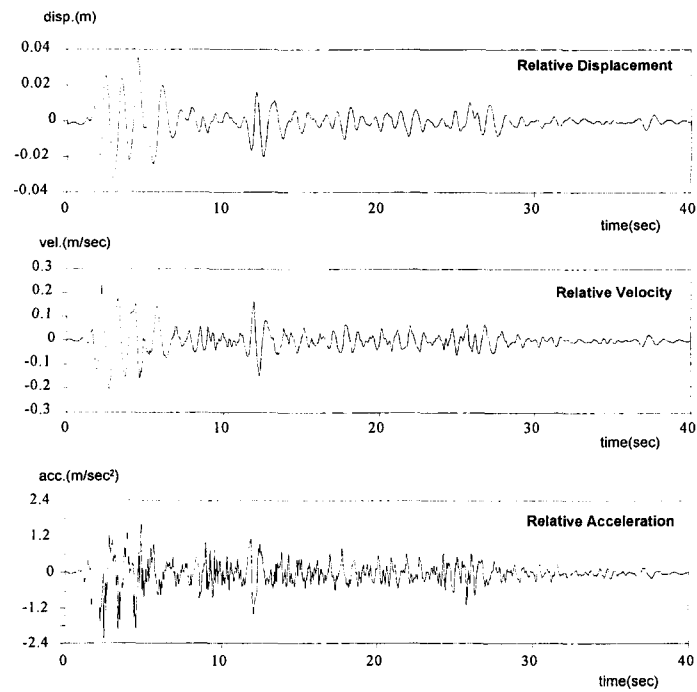


그림 7. 고정단 교각 상단부 절점의 상대 운동

4. 결론

교량의 비선형 해석을 수행하기 위해서는 기둥부재의 비선형성을 반드시 반영해야 한다. 이 연구에서는 이를 위해 구조요소의 일종인 섬유요소를 도입하였다. 섬유요소는 정확도를 유지하면서 CO 유한 요소에 비해 경제적이고, 교량 전체의 모델링에 사용할 수 있다. 3 경간 연속교량을 채택하여 비선형 3차원 지진해석시 섬유요소의 적용성을 검토하였다.

5. 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 2001년도 “교각 내진성능 평가 및 교량 비선형 내진해석프로그램 개발”의 사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 연구자 여러분께 감사드립니다. 해석에 사용된 프로그램은 위 사업에서 개발된 SCAP(Seismic Capacity Analysis Program)을 이용하여 해석되었습니다.

참 고 문 헌

1. 한국건설기술연구원. “교각 내진성능 평가 및 교량 비선형 내진해석 프로그램 개발”, 한국건설기술연구원 연구보고서 건기연 2001-078, 2001.
2. Spacone, E., Filippou, F.C. and Taucer, F.F, “Fibre Beam-Column Model for Nonlinear Analysis of R/C Frames:Part I. Formulation”, Earth. Eng. Struct. Dyn., Vol. 25, pp. 711-725, 1996a
3. Spacone, E., Filippou, F.C. and Taucer, F.F, “Fibre Beam-Column Model for Nonlinear Analysis of R/C Frames : Part II. Applications”, Earth. Eng. Struct. Dyn., Vol. 25, pp. 727-742, 1996b
4. 조근희, “유연도법 섬유요소모델에 의한 철근콘크리트 교각의 연성능력 평가”, 박사학위논문, 서울대학교, 2001. 2.
5. Mark Austin, Xiaoguang Chen and Wane-Jang Lin, “Aladdin : A Computational Toolkit for Interactive Engineering Matrix and Finite Element Analysis”, University of Maryland, 1995.
6. Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R., “Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete”, J. Struct. Engrg., Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826, 1988a
7. 한국지진공학회, “도로교의 내진설계”, 제 6회 기술강습회 자료, 2000.
8. PEER, PEER Strong Motion Database(<http://peer.berkeley.edu>)
9. 조정래, 곽임중, 조창백, 김병석, 김영진, “섬유요소를 이용한 교량의 지진해석”, 한국지진공학회 2002년 춘계학술발표회 논문집, pp. 151-158, 2002.