

섬유요소를 이용한 교량의 지진해석 Seismic Analysis of a Bridge Using Fiber Element

조정래*,곽임종**,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 behaviour of bridges is allowed under large earthquake. The nonlinearity is, however, localized like pier, bearing, etc. Especially, pier columns are most important members for seismic performance. It is, however, difficult to solve the problem how the nonlinearity of columns should be modelled. In this study, the fiber element is used 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 analyzed. Second, Linear and nonlinear dynamic analyses using simplified model for longitudinal direction are carried out and the results are analyzed.

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

1. 서 론

현재의 내진설계 개념은 큰 지진시 경제성을 고려하여 교량에 대해 어느 정도 비선형 거동을 허용하고 있다. 교량에서 큰 지진시 비선형 거동을 보일 가능성이 있는 부재는 교각과 교량부속장치 등의 일부 부재이다. 특히 교각은 큰 지진시 교량에 발생하는 지진력을 전달하는 주요 부재로서 소성힌지와 같은 소성변형이 발생할 수 있다. 일반적으로 내진설계시에 선형해석결과를 응답수정계수로 보정하는 방식으로 교각의 비선형 거동을 고려한다. 하지만 교량의 내진성능을 평가하기 위해서는 직접적인 비선형 해석이 필요하다.

기둥과 같은 비선형 부재를 모델링하는 방법은 OO 유한요소를 사용하는 방법과 뼈대요소와 같은 구조요소(structural element)를 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. 구조요소를 사용하는 방법은 전체 구조물과 각 부재의 지진시 거동에 대해 깊은 통찰력을 유지하면서 경제적이란 장점이 있다. 구조요소로 기둥을 모델링하는 방법 역시 크게 집중소성모델(lumped parameter model)과 분산소성모델

* 정회원, 한국건설기술연구원 연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원

*** 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

(distributed plasticity model)로 나눌 수 있다. 이중 분산소성모델은 소성힌지가 부재 축방향으로 확대되는 현상을 합리적으로 모델링할 수 있다. 본 연구에서 교각의 비선형성을 모델링하기 위해 섬유요소(fiber element)를 도입하였다. 섬유요소는 Spacone, Filippou, Taucer 등이 제안하였는데, 유연도법에 기초하고 있으며 분산소성모델이다. 본 연구에서는 3경간 연속교량에 채택하여 지진해석을 수행하였다. 먼저 기둥을 섬유요소로 모델링하여 정해석을 수행하여 기둥특성을 파악하였다. 두 번째로 교량교축방향에 대해 단자유도로 간략화된 모델에 대해 섬유요소를 이용한 경우와 균열전 단면의 전체 강성과 최외곽철근의 항복을 기준으로 한 유효강성을 이용한 공간뼈대요소로 이용한 경우에 대해 각각 해석을 수행하여 비교하였다.

2. 섬유요소

2.1 섬유요소 개요

유연도법(flexibility method)에 기초하여 분산소성을 모델링할 수 있는 섬유요소(fiber element)는 Spacone, Filippou, Taucer 등이 처음으로 제안하였다.⁽²⁾ 섬유요소는 전단변형을 무시하는 Bernoulli 보이론을 가정하여 형상비(aspect ratio) 3.5 ~ 5이상의 휨이 지배적인 거동을 보이는 기둥에 적용할 수 있다. 최근 조근희⁽⁴⁾, Mark Austin⁽⁵⁾ 등의 연구에서는 Timoshenko 보이론을 도입하여 단면의 평균적인 전단변형 효과를 반영할 수 있도록 수정된 이론이 제시되고 있다. 하지만 전단변형과 관련된 구성방정식의 부재로 적용하기에는 아직 힘들다.

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. 그림 1은 섬유요소의 개요를 나타내고 있다. 섬유요소 정식화에 있어서 핵심적인 사항은 주어진 변위로부터 정확한 내력을 결정하는 부분이다. 이를 위해 유연도법(flexibility method)에 기초하는 데, 알고리즘을 개괄적으로 설명하면 다음과 같다. 주어진 절점 변위로부터 적분점이 존재하는 위치에서의 단면력으로 보간하고, 단면력으로부터 단면변형을 계산하고, 그 단면내의 이산화된 섬유의 변형을 구한다. 각각의 섬유의 변형으로부터 비선형 재료 모델에 의해 응력을 계산하고 이를 적분하여 단면내력을 계산한다. 이때 계산된 단면내력과 앞서서 보간된 단면력이 평형을 이루도록 반복계산한다. 평형이 이루어진 단면력 상태를 다시 부재축방향으로 적분하여 절점에서의 절점내력을 최종적으로 계산한다. 이상은 휨-압축 거동과 관련된 알고리즘이고, Spacone, Filippou, Taucer 등이 최초로 제안한 부분이다.⁽²⁾ 전단변형의 효과는 단면전단력과 단면전단변형의 비선형구성방정식이 주어지는 경우, 단면 수준에 고려할 수 있도록 알고리즘을 쉽게 확장할 수 있다.^{(1), (4), (5)}

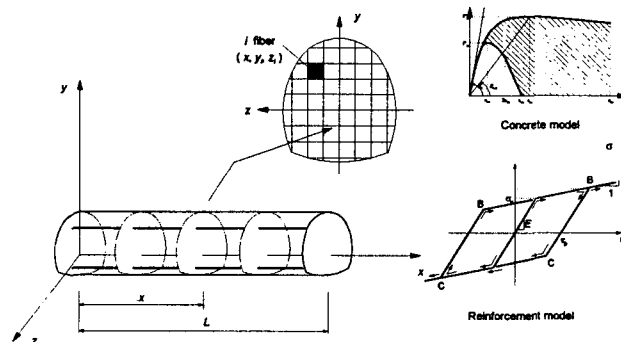


그림 1 섬유요소 개요

2.2 재료 모델

섬유요소는 철근콘크리트 기둥과 같은 부재를 해석하기 위해 개발된 유한요소로 어떤 구성방정식을 사용하는가에 따라 모델의 정밀도가 크게 좌우된다. 섬유요소에서 필요한 구성방정식은 휨-압축 거동으로 인한 수직힘응력을 모델링하는 1축 응력-변형도 관계(Uniaxial stress-strain relation)와 전단변형을 고려할 때의 단면 수준의 단면전단력-단면전단변형도 관계이다. 본 연구에서는 콘크리트 재료모델로 Mander, Priestley, Park 등이 제안한 콘크리트 모델을 사용하였다.⁽⁶⁾ 이 모델은 횡방향 철근에 의해 구속된 콘크리트의 성질을 효과적으로 모사할 수 있고, 또한 구속효과가 없는 일반 콘크리트와 주철근 외부의 덮개 콘크리트(cover concrete)까지 일관성있게 표현하고 있다. 철근의 응력-변형도 관계 모델링은 실험결과로부터 도출된 Menegotto, Pinto 등의 모델에 Baushinger 효과, 콘크리트 내의 등방성 변형 경화 현상을 고려하여 더욱 정밀한 모델이 존재하지만,⁽⁴⁾ 현재는 간단한 bilinear model을 사용하였다. 전단력-전단변형 관계 역시 현재 간단한 bilinear model로만 구성되어 있고, 정밀한 모델을 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다. 내진설계가 고려된 기둥의 경우 구속콘크리트, 비구속콘크리트, 철근에 대해 각각 재료모델을 구성하여 해석하고, 내진설계가 되지 않아 횡방향 철근에 의한 구속효과가 없을 경우에는 일반 콘크리트와 철근 모델을 조합하여 해석할 수 있다.

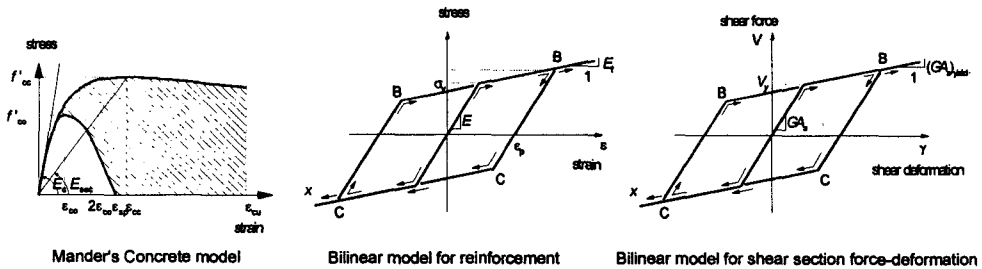


그림 2 구성 방정식

재료모델을 섬유요소에 적용하기 위해서는 모든 경우에 대해 정확히 정의되어야 한다. 본 연구에서는 Mander, Priestley, Park 등이 제안한 콘크리트 모델은 재재하(reloading) 상태에서 다시 제하(unloading)되는 부분을 추가적으로 정의하여 사용하였다. 그림 3 과 같이 재재하 단계에서 제하가 일어날 경우 소성변형도가 줄어든다는 개념에서 새로운 제하점(unloading point)과 소성변형도점을 계산하고, 계산된 제하점을 기준으로 제하곡선을 따라가도록 정의하였다.⁽¹⁾

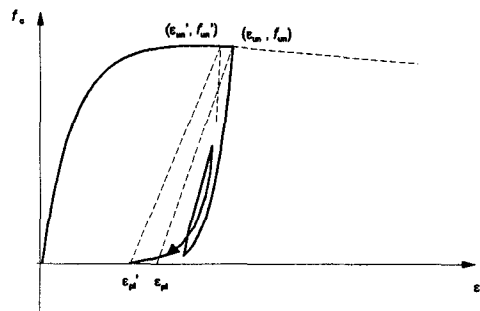


그림 3 재재하곡선(Reloading branch)에서의 제하(Unloading)

3. 해석 예제

3.1 해석 개요

섬유요소를 이용하여 그림 4, 그림 5와 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. 동해석시 사용된 지반입력은 1940년 E1 Centro 지진(IMPERIAL VALLEY 5/19/40 0439, EL CENTRO ARRAY #9, 180))⁽⁸⁾을 국내 설계기준인 가속도 계수 0.154g에 맞추어 사용하였다. 고정단에 P1의 한쪽 기둥을 대상으로 정적해석을 수행하여 기둥의 특성을 분석하고, 교축방향에 대한 동해석을 수행하였다.

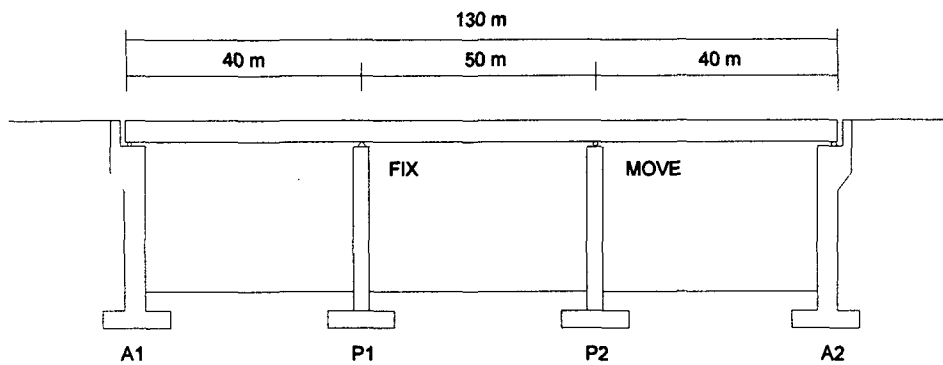


그림 4 3경간 연속 예제 교량

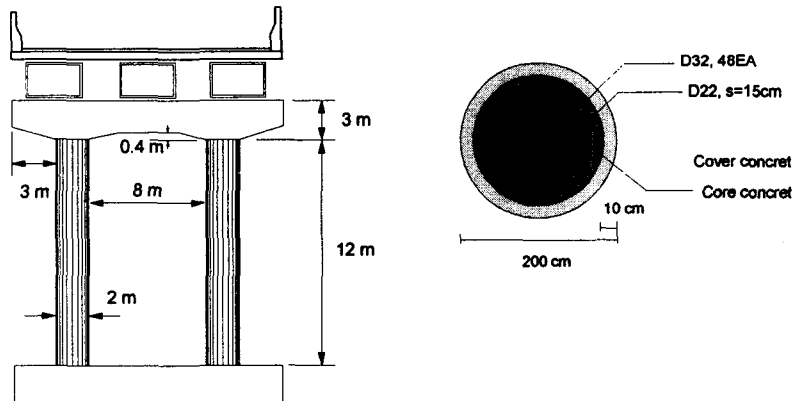


그림 5 P1 교각

3.2 정해석에 의한 기둥특성 분석

P1의 좌측기둥을 대상으로 그림 6과 같은 정해석을 수행하였다. 기둥은 섬유요소로 모델링하였다. 철근, 구속콘크리트, 비구속덮개콘크리트 부분으로 나누어 총 354개의 섬유요소로 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.

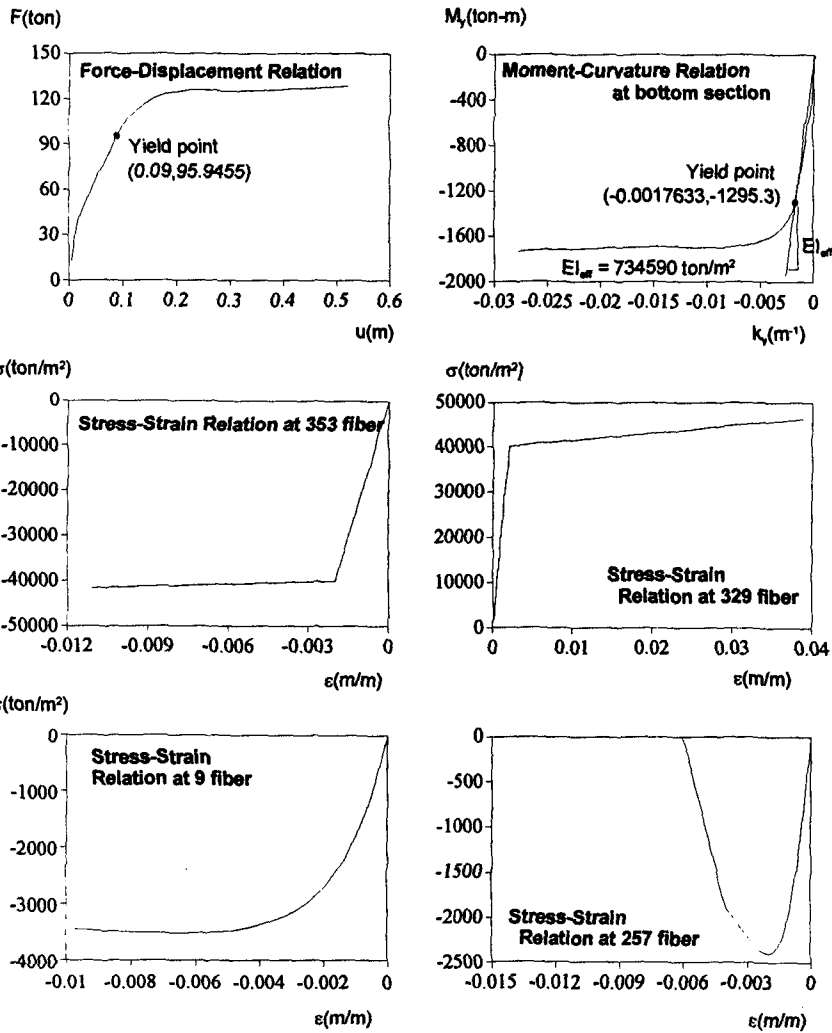
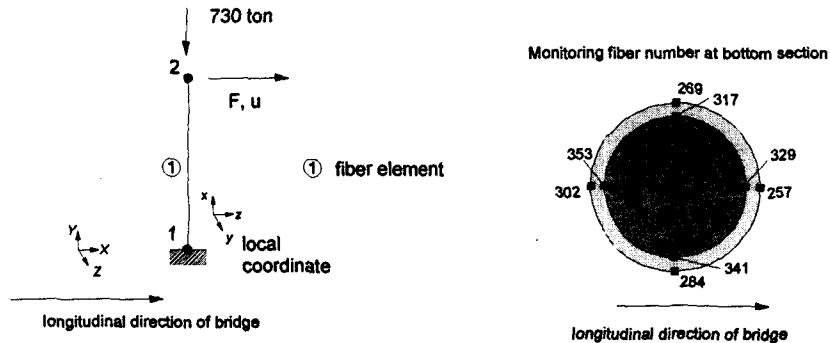


그림 6 기둥의 정해석 모델 및 해석결과

그림 6에서 횡방향 하중-변위 곡선, 소성힌지가 발생하는 기초부의 단면모멘트-단면곡률 곡선, 철근의 응력-변형도 곡선, 덮개콘크리트 및 심부구속콘크리트의 응력-변형도 곡선을 나타내고 있다. 최외곽 철근의 항복을 기준으로 한 단면의 유효강성 EI_{eff} 는 $7.35 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 으로 계산되었는데 균열 전 단면강성 EI_g ($1.82 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)와 비교해서 약 40 % 수준이다. 먼저 최외곽 철근이 항복하고,

콘크리트 덮개부의 스폴링(spawling)이 일어났으며 최종적으로 최외곽의 심부구속철근이 극한변형도에 도달하여 기둥이 파괴되었음을 확인할 수 있다.

3.3 교량의 교축방향 시간이력해석

교량의 교축방향에 대해 시간이력해석을 그림 7과 같이 기둥과 기둥 상단의 질량이 집중($m=166.56 \text{ ton-sec}^2/\text{m}$)되어 있는 것으로 간략화하여 해석하였다. 기둥을 섬유요소와 선형요소인 공간뼈대요소로 각각 모델링하여 해석하였다. 공간뼈대요소의 경우 균열전 전단면 강성 $EI_g = 1.82 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 를 사용한 경우와 앞서의 정해석에서 계산한 최외곽 철근의 항복을 기준으로 한 단면의 유효강성 EI_{eff} 는 $7.35 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 을 사용한 두가지 경우에 대해 해석을 수행하였다.

그림 7에서 교각 상단부의 상대변위, 상대속도, 부재내력을 섬유요소를 이용해 비선형해석한 경우 EI_g , EI_{eff} 를 사용한 공간뼈대요소로 선형해석한 경우의 응답이력을 비교하여 표시하였으며, 섬유요소를 사용한 경우 단면모멘트-단면곡률 곡선을 나타내었다. 단면모멘트-단면곡률 곡선에 현재의 지진수준은 기둥이 항복(최외곽 철근의 항복 기준)하지 않는 범위내에서 이루어 짐을 알 수 있다. 또한 EI_g 값을 사용하여 선형해석을 하는 경우는 변위응답 및 부재내력응답을 과대평가함을 알 수 있다. EI_{eff} 를 사용하여 선형해석하는 경우는 응답이력상의 차이는 존재하나 최대값을 기준으로 비선형해석과 거의 유사한 결과를 나타낸다. 그 이유는 현재의 지진수준이 단면모멘트-단면곡률 곡선에서 확인 할 수 있듯이 단면이 항복하기 이전으로 한정되어 있고, 이 구간은 EI_{eff} 를 가정하는 데 사용한 직선의 기울기와 유사한 기울기를 보이기 때문이다.

4. 결론

교량의 비선형 해석을 수행하기 위해서는 기둥부재의 비선형성을 반드시 반영해야 한다. 기둥부재의 비선형성을 고려하기 위한 여러 유한요소가 존재한다. 본 연구에서 도입한 섬유요소는 구조요소이면서 기둥 높이와 단면간의 형상비가 커서 휨 거동이 지배적인 경우 정확한 결과를 도출하는 유한요소이다. 또한 CO 유한요소에 비해 경제적이고, 교량 전체의 모델링에 사용할 수 있다. 예제교량으로 3 경간 연속교를 채택하여 기둥에 대한 간단한 정해석을 수행하여 특성을 파악하였다. 교축방향에 대한 동해석은 섬유요소를 이용한 경우와 균열전 단면의 전체 강성과 최외곽철근의 항복을 기준으로 한 유효강성을 이용한 공간뼈대요소로 이용한 경우에 대해 각각 해석을 수행하여 비교하였다. 시간이력 해석결과 균열전 단면의 전체 강성을 이용하여 선형해석하는 것은 응답을 과대평가하며, 유효강성을 사용한 선형해석은 본 연구의 해석시에 사용한 지진에서는 적절한 것으로 판단된다. 하지만 지진의 크기와 주파수 성분에 따라 이는 응답의 차이가 있을 수 있으므로, 보다 정확한 해석결과를 도출하기 위해서는 비선형해석이 도입되어야 하고, 섬유요소를 이용하는 것이 정밀도와 경제성 면에서 적절한 선택일 수 있다.

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.

Dynamic analysis of column

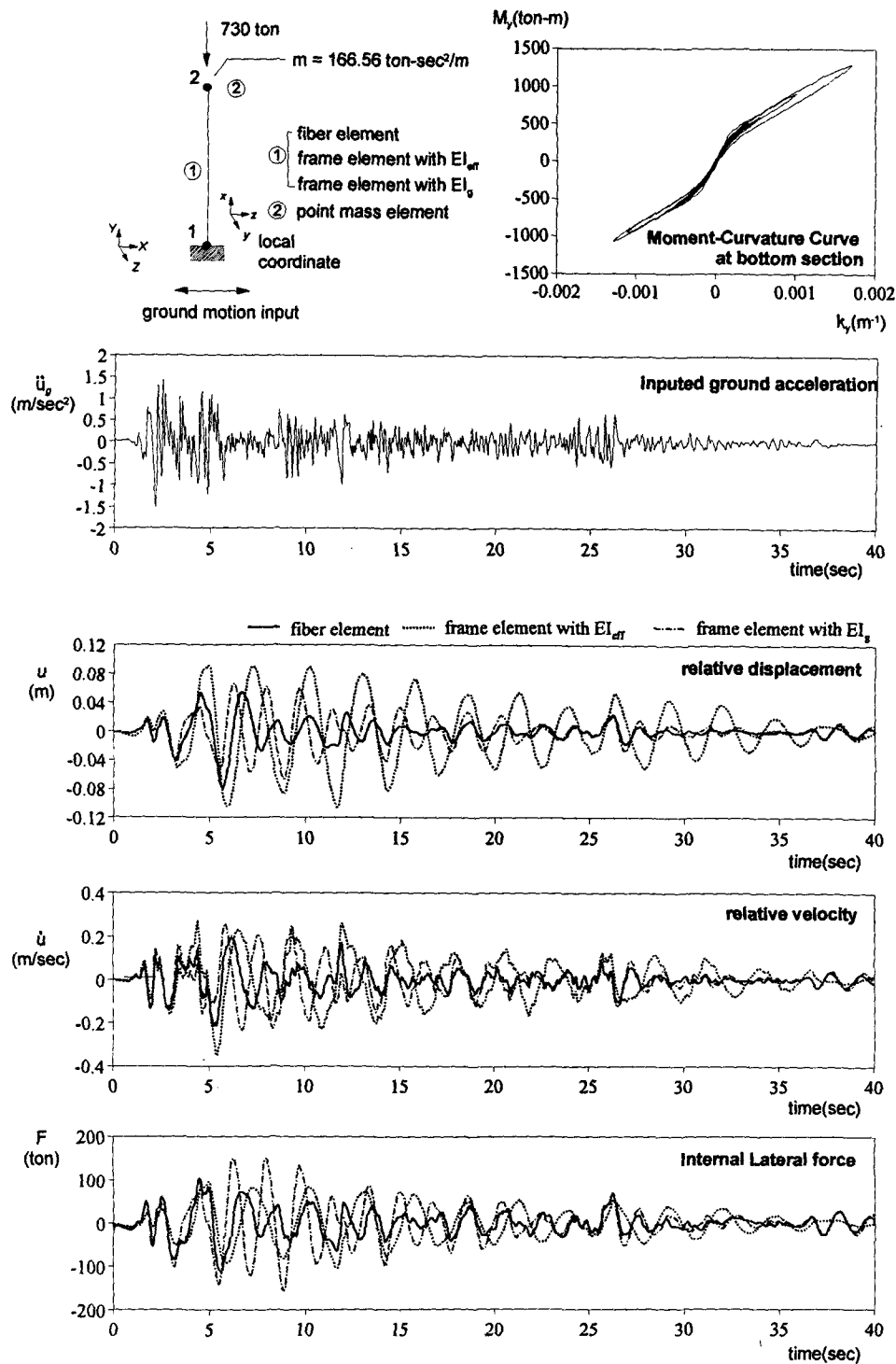


그림 7. 동해석 모델 및 해석결과

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>)