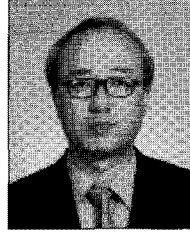
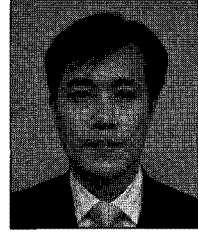


섬유요소 모델링 기법을 이용한 재료비선형 지진해석

Earthquake Analysis Considering Material Nonlinearity using Fiber Element Modeling Method



변순주*



송치훈**

* (주)알피에스스트럭처 소장

** (주)알피에스스트럭처 기술연구소 차장

1. 서론

철근콘크리트 구조물에 풍하중이나 파압 또는 지진과 같은 횡하중이 작용하게 되면 휨력과 전단력이 발생하며, 구조부재의 저항력이나 연성이 충분하지 않을 경우 상당한 손상을 입게 된다. 그러므로 안전성을 평가하는데 있어서 작용하중에 의하여 발생하는 구조부재 내의 휨과 변위의 요구량과 이에 대하여 구조부재가 견디어 줄 수 있는 한계를 적절하게 산출해 내는 것은 매우 중요하다. 일반적인 RC 구조물의 저항강도의 정확한 평가를 위해서는 3차원 해석 즉 3차원 유한요소와 3차원 구성모델이 필요하다. 실제 구조물에 기초를 둔 3차원 솔리드 요소에 의한 해석은 정확한 결과를 얻을 수 있다는 장점이 기대되지만 신뢰성 있는 재료모델의 개발이 어려우며 데이터 및 계산량이 방대하여 실제 문제에 적용하기가 매우 어렵다. 따라서 RC 구조물을 등가 환산단면을 이용하여 빔요소로 해석이 가능하도록 하고 신뢰성있는 연구자들의 실험결과와 비교하여 타당성을 검증하였다. 또한, 횡방향 구속철근이 배근된 RC 구조물의 비탄성거동을 적절히 표현할 수 있는 해석기법을 개발하여 지진하중과 같은 반복하중에 대한 RC 구조물의 파괴거동을 예측하였다. 2차원 응력상태에서의 RC 요소의

구성방정식은 RC 평면 구조물의 비선형 유한요소해석에서 다른 비선형 재료모델을 적용하였으며 간단히 요약하면 다음과 같다. RC는 복합재료이며 재료의 비선형성은 타 구조재료에 비해 극히 복잡하다. 특히 균열발생 후의 응력분포는 비선형성에 의해 현저하게 변화되며, 이러한 재료적 비선형성(Material Nonlinearity)에 대해서는 RC 요소의 직교이방성의 가정에 따라 균열 직각방향으로 콘크리트가 부담하게 되는 인장응력을 고려하기 위한 인장강성모델과 균열방향으로의 압축강성 저하를 고려하기 위한 압축강성모델을 각각 적용하였다. 또한 콘크리트 속이 철근에 대한 항복 후 거동은 철근만의 특성과 함께 부차효과 등이 동시에 고려되어야 한다. 횡방향으로 배근된 구속철근은 콘크리트의 극한강도와 극한변형률을 크게 증가시키는 효과를 가져다 준다. 이와같이 증가된 콘크리트의 강도와 변형률로 인해서 지진하중 등과 같은 반복하중을 받는 경우에 콘크리트의 부재는 구속되지 않은 경우에 비해서 우수한 연성능력 및 복원력 특성을 나타낸다. 구속된 콘크리트의 압축강성을 표현하기 위한 압축응력-압축변형률 관계를 대해서는 많은 연구자들(Mander 등, 1988; Sheikh 등, 1980)이 제안한 모델이 있으며, 본 고에서는 콘크리트의 단면형상에 관계없이 적용할 수 있고, 종방향 철근 및 구속철근의 양, 구속

철근의 항복강도 및 배근형태 등을 고려할 수 있도록 한 Mander 등 (1988)의 제안모델을 채택하였다.

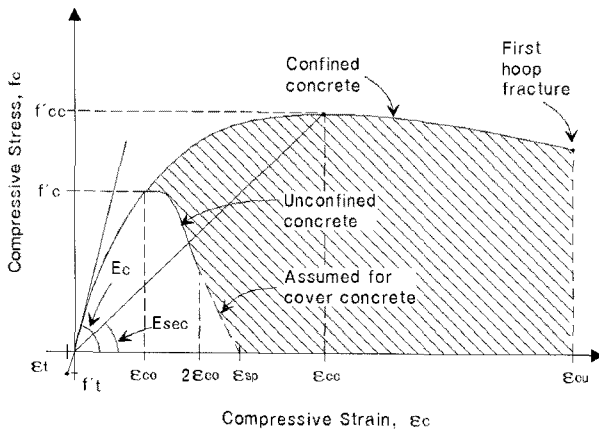


그림 1 횡철근 구속에 의한 콘크리트의 강도 및 연성증가

2. 지진거동의 분석

2.1 지진거동의 분석방법

지진거동을 분석하는 데에는 정적 및 동적해석 방법이 있다. 정적해석이란 동적인 지진력을 정적인 힘(관성력)으로 치환하여 그 정적인 힘이 구조물에 작용할 때의 변위나 단면력을 구하는 해석법으로 진도법(탄성 영역의 거동을 고려)이나 지진시 보유 수평내력법(탄소성 영역의 거동도 고려)이 정적해석에 속한다. 동적해석이란 지진시의 구조물의 동적인 거동을 추적하는 해석법으로 응답 스펙트럼법, 주파수 응답해석법, 시간이력 응답해석법 등이 있다. 구조물의 지진시 거동을 정적인 현상으로 대치하는 정적해석에는 적용법이나 정밀도에 한계가 있다. 이에 반해 동적해석은 실제에 가까운 거동특성을 합리적으로 추정할 수 있어 합리적이며, 신뢰성이 높은 설계가 가능하다고 할 수 있다. 동적해석과 정적해석의 큰 차이는 지진시의 거동이나 최대 응답치를 산출하는 해석법이다. 정적 해석에서는 비교적 단순한 구조에 대하여 적용 가능한 진도법이나 지진시 보유수평 내력법을 이용하고, 동적 해석에서는 시간이력 응답해석법 등이 동적해석법에 의하여 지진시 거동을 평가하게 된다. 산출된 최대응답치를 이용한 부재의 내력이나 소성률, 교량 전체의 변위 등에 대한 검토의 기본은 동적해석법과 정적해석법이다. 또, 설계 검토를 만족하지 않는 경우에 대하여 철근량을 증가시키거나 단면 내력을 증가시키거나 건전성을 향상시키거나 하는 단면변경 및 구조변경을 행하는 경우에 대해서도 다르지 않다. 정적 및 동적

재료비선형 지진해석의 해석절차는 다음과 같다.

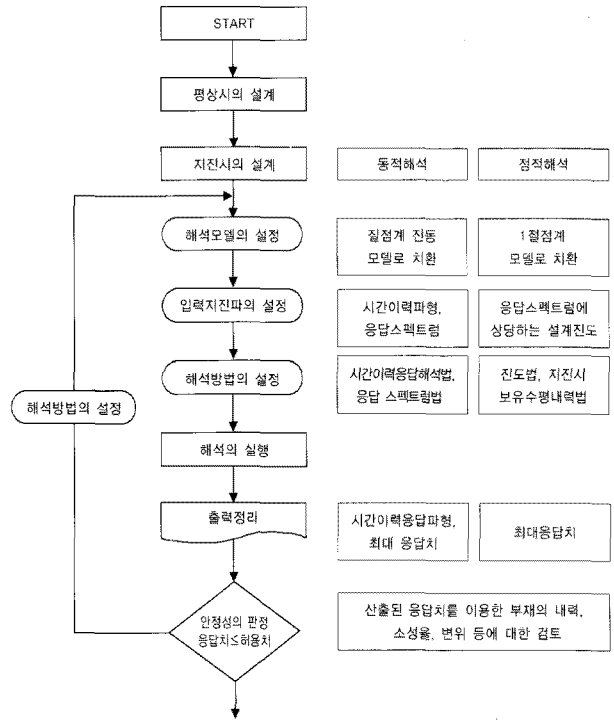


그림 2 지진해석 절차

2.2 섬유요소를 이용한 비선형해석

2.2.1 섬유요소 개요

전단력-변위의 관계식을 구하기 위해서는 구조물의 비선형 해석이 필요하다. 구조물은 지진하중에 의한 관성력이 구조물 하단에 집중되어 작용하기 때문에 구조물 하단에 소성현지가 발생하게 된다. 이 경우 하단의 소성현지에 의한 비선형 거동특성을 잘 나타낼 수 있는 해석기법을 사용하여야 한다. 본 고에서는 철근 콘크리트 구조물의 휨거동을 보다 정밀하게 묘사할 수 있는 Fiber Model을 사용하였다. 섬유요소는 증립축에 수직한 단면은 변형 후에도 평면을 유지하고 수직한 베르누이 보 이론을 기초로 고안되었다. 이는 각각의 축방향 섬유에 대하여 응력-변형을 관계가 주어지면 기존의 솔리드 요소보다 간편하고 정밀하게 휨거동을 계산할 수 있다. 단면을 이루고 있는 섬유들은 각각 주철근이 포함된 콘크리트 영역(Reinforced Concrete, RC), 무근 콘크리트(Plain Concrete, PC)로 이루어 질 수 있으며 횡철근에 의해 둘러싸인 무근 콘크리트 영역은 구속효과에 의한 콘크리트의 응력-변형을 관계를 도입하여 보다 정확한 구조물의 연성거동을 평가할 수 있다. 다음 그림 3은 Fiber요소를 이용한 기둥의 모델링에 대해 나타낸 것이다.

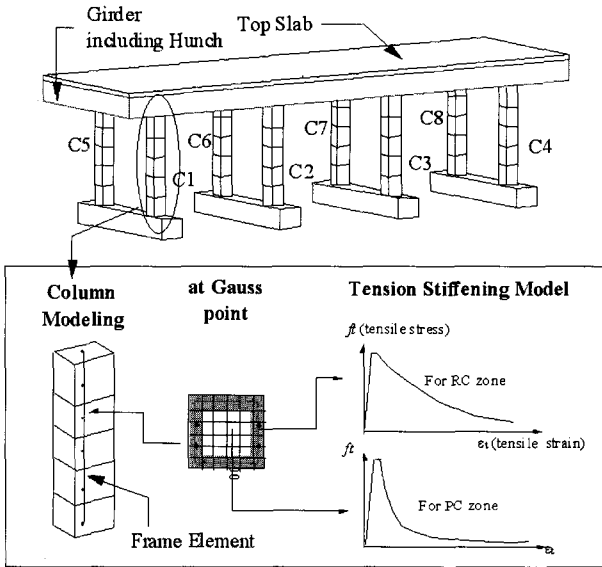


그림 3 섬유요소를 이용한 기둥의 모델링

2.2.2 재료모델링

인장 및 압축 또는 교번반복하중을 받는 철근콘크리트는 균열에 의하여 변형이 발생하며 이에 따라 균열이 발생한 곳과 그렇지 않은 곳에서 균일한 다른 응력-변형을 분포를 보인다.

그러나 본 고에서는 보다 용이한 해석을 위해 일반적인 연속체와 같이 균열이 고르게 분포되어 있다고 가정하고 그림 4와 같이 응력-변형을 관계를 산정한다.

이때 철근과 콘크리트가 접해있는 부분은 서로의 거동에 영향을 주어 각각인 경우의 응력-변형을 관계와는 매우 상이하며, 이를 고려하여 그림 5와 같은 각각의 다양한 비선형 재료모델을 사용하였다.

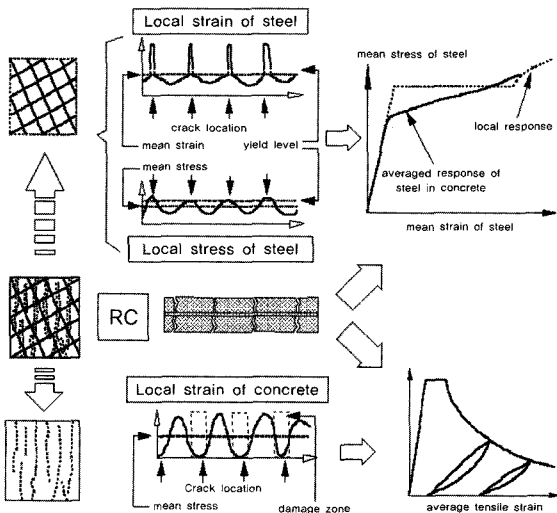
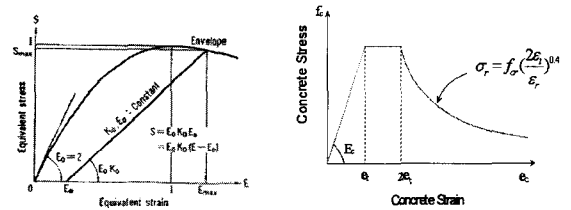
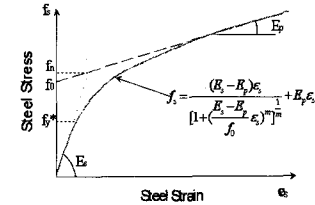


그림 4 분산 균열모델



압축 콘크리트 Stress-strain 모델

인장 콘크리트 Stress-strain 모델



철근 Stress-strain 모델

그림 5 비선형 재료모델

2.3 해석모델 및 입력함수

2.3.1 검토단면

본 고에서 지진해석을 수행한 교량은 그림 6과 같이 총 연장 530m, 경간장이 각각 50m, 95m, 240m, 95m, 50m이고 교폭은 13.7m인 2주탑 사장교로서 상부구조는 PSC박스로 되어 있고 기초는 현장 타설말뚝 형식이다. 주탑은 그림 7과 같이 높이 68m, 폭 21m이고 받침형식은 남면진 받침을 사용하였으며, 재료비선형 섬유요소를 적용한 부분은 그림 7의 ①~⑥과 같다.

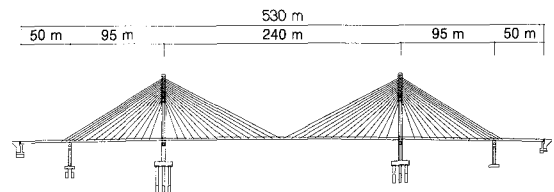


그림 6 교량의 종단면도

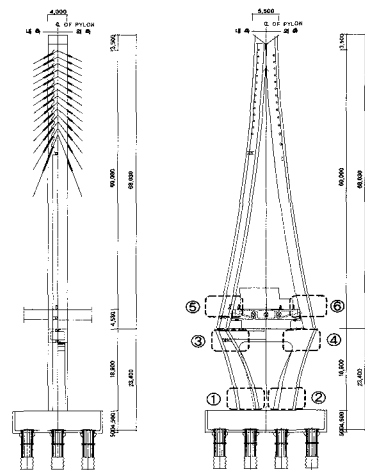


그림 7 주탑 일반도

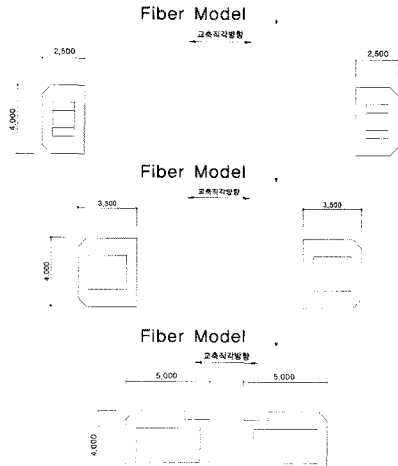


그림 8 섬유요소 적용단면

2.3.2 해석모델

유한요소해석을 위하여 교량을 빔요소로 전체계 모델링을 하였고 지진시 정밀한 휨거동의 분석이 요구되는 주탑 하단부는 재료의 비선형 특성을 고려한 섬유요소로 모델링 하였다. 해석프로그램은 FORUM8에서 개발된 UC-win/F RAME(3D)이 사용되었다.

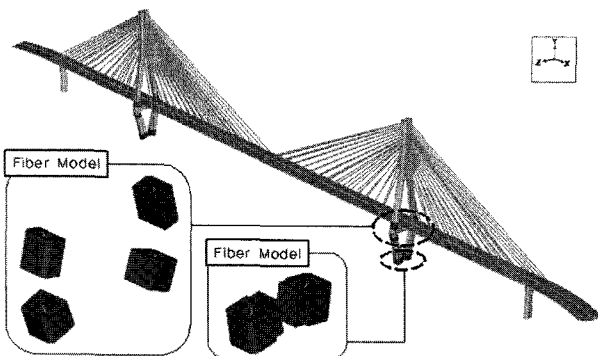


그림 9 전체계 빔요소 모델링 및 Fiber 모델 구성

2.3.3 내진검토 기준

지반가속도계수 A에 대한 탄성지진 응답계수

$$C_{sm} = \frac{1.2 \cdot A \cdot S}{\frac{2}{3} T_m} \leq 2.5A$$

여기서, A : 지반가속도계수
 S : 무차원 지반계수
 T_m : m번째 진동모드의 주기

2.3.4 시간이력 및 응답스펙트럼

해석에 사용된 지진파는 도로교설계기준에 따른 응답

스펙트럼에 맞도록 SIMQKE를 사용하여 추계학적으로 생성하였다. 시간이력의 포락함수는 사다리꼴로 하였고 포락함수의 매개변수는 ASCE(1998)에 제안한 규모 6.0~6.5 구간을 적용하여 상승시간은 1.0초, 강진동의 지속시간은 7.0초 감쇠시간은 5.0초로 결정하였다. 생성된 지진파 및 응답스펙트럼은 그림 10~12에 나타내었으며, 그림 13~14는 생성된 지진파를 각 방향별로 프로그램에 입력한 것이다.

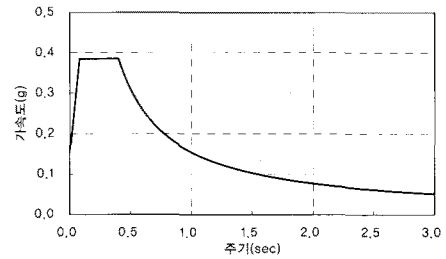


그림 10 응답 스펙트럼

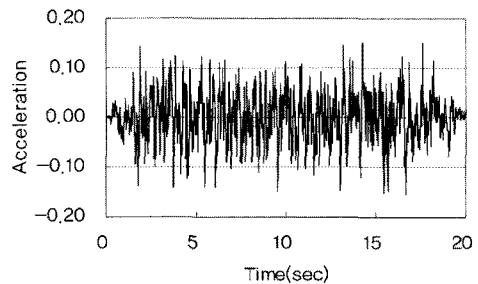


그림 11 가속도 시간이력

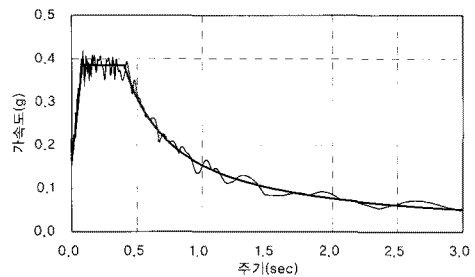


그림 12 가속도 스펙트럼

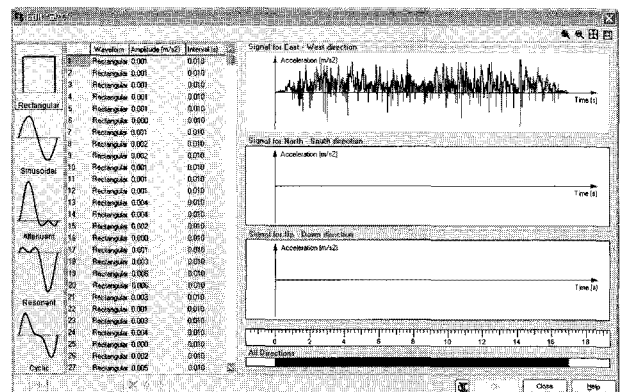


그림 13 교축방향 입력지진파

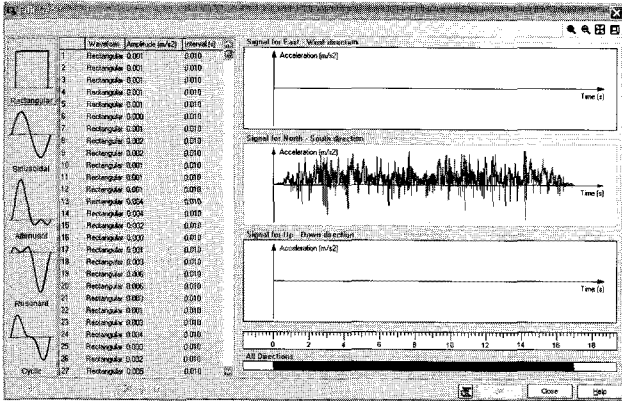


그림 14 교축 직각방향 입력지진파

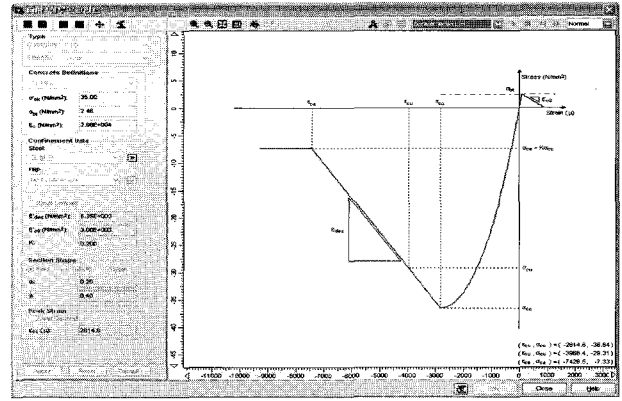


그림 17 심부 콘크리트 (횡방향 철근의 구속효과 고려)

2.3.5 입력 물성치 및 재료비선형 이력곡선

해석에 사용된 입력물성치 및 재료비선형 응력-변형률 이력곡선은 그림 15~19이다. 철근은 인장하중에 대해서는 bi-linear 모델로 하였고 압축하중에 대해서는 좌굴에 의한 응력감소를 고려하기 위하여 tri-linear 모델로 하였다. 피복 콘크리트는 횡방향 구속철근의 영향이 없기 때문에 비구속 콘크리트 모델을 사용하였고, 심부구속 콘크리트는 횡구속 철근비를 0.9%로 하여 일본도로교시방서(일본도로협회, 2002)의 내진설계편에 제시된 응력-변형률 모델이 이용되었다.

그림 17에서 보는바와 같이 그림 16의 피복콘크리트와 비교하여 볼때 횡방향 철근의 구속 효과로 인하여 최대 변형률의 증가효과와 압축강도 감소의 지연효과를 확인할 수 있다.

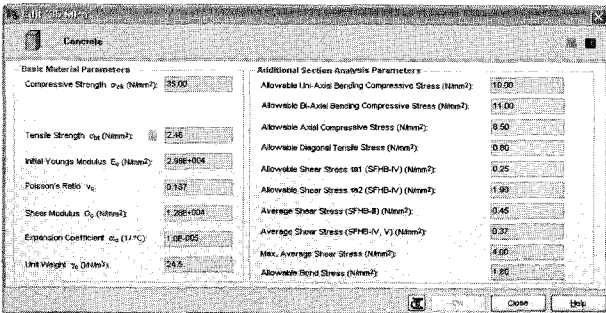


그림 15 콘크리트 입력물성치

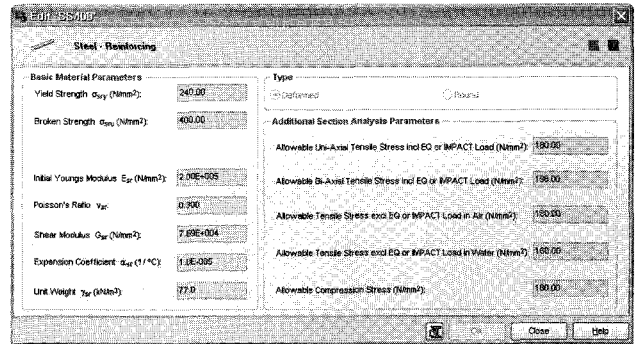


그림 18 철근 입력물성치

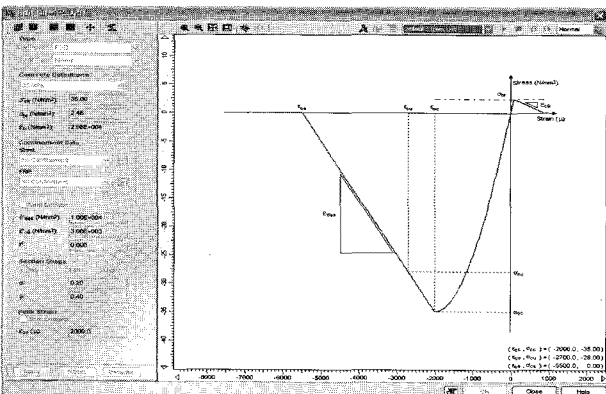


그림 16 피복 콘크리트

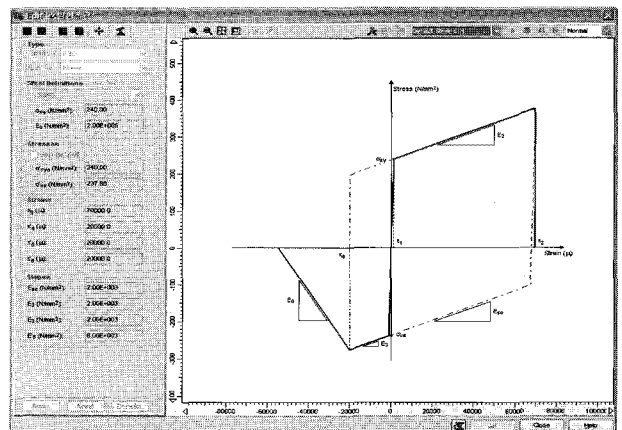


그림 19 축방향 철근

2.4 지진해석 결과

인공지진 시간이력을 범요소 및 섬유요소로 작성한 해석모델에 교축 및 교축 직각방향으로 각각 재하하였을 경

우 주탑 하단부의 소성힌지 영역에서의 최대 변위 및 회전은 각각 다음과 같다. 그림에서 보는 바와같이 교축방향에 비해 교축 직각방향으로 큰 응답을 나타내고 있다.

2.4.1 교축방향 지진력 작용시

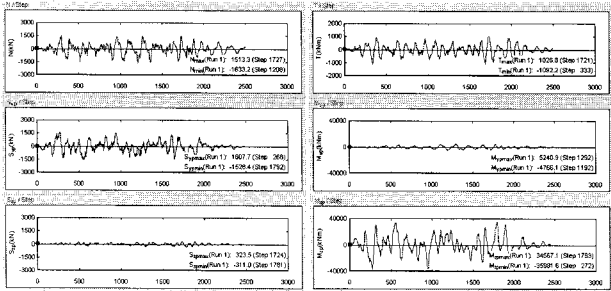


그림 20 모델 ②의 Translation과 Rotation

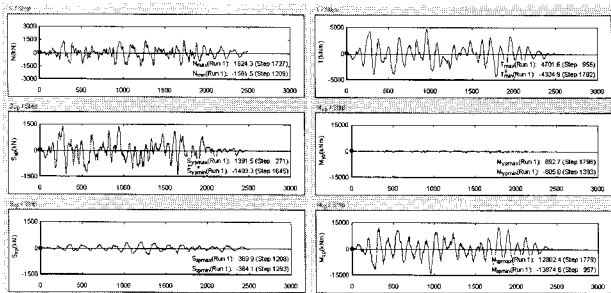


그림 21 모델 ④의 Translation과 Rotation

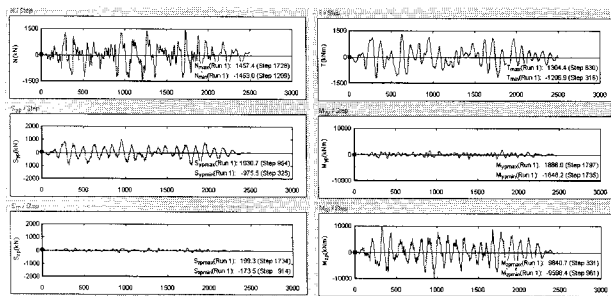


그림 22 모델 ⑥의 Translation과 Rotation

2.4.2 교축 직각방향 지진력 작용시

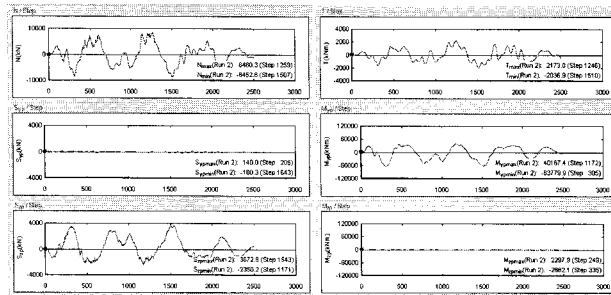


그림 23 모델 ②의 Translation과 Rotation

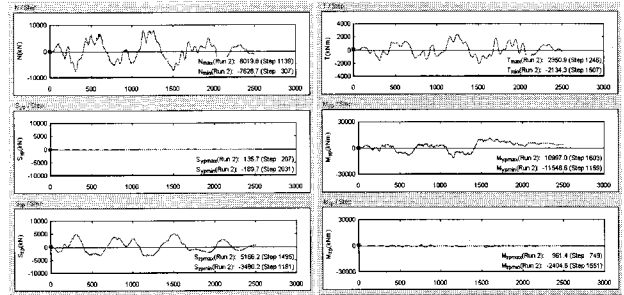


그림 24 모델 ④의 Translation과 Rotation

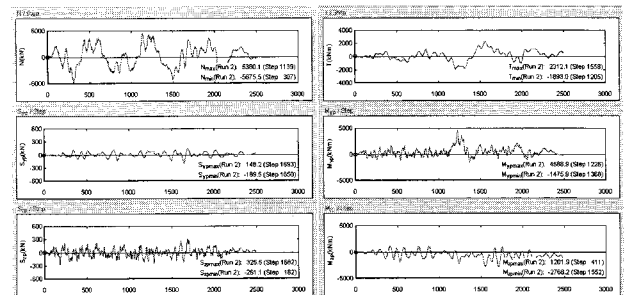


그림 25 모델 ⑥의 Translation과 Rotation

2.5 재료비선형 단면해석 결과

인공지진 시간이력을 범요소 및 섬유요소로 작성한 해석 모델에 교축 및 교축 직각방향으로 각각 재하 하였을 경우 주탑 하단부 소성힌지영역에서의 변형율을 기준으로 산출된 단면손상도 및 재료비선형 거동곡선은 다음과 같다.

2.5.1 교축방향 지진력 작용시

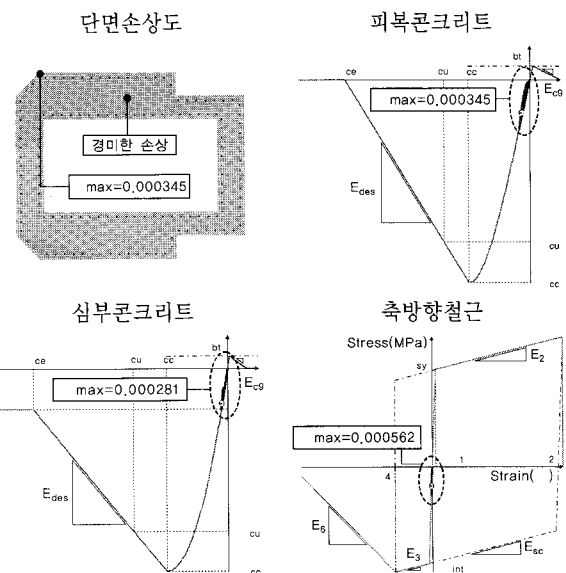
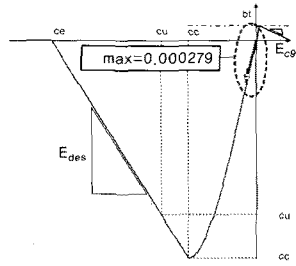


그림 26 Fiber Model ② 해석결과

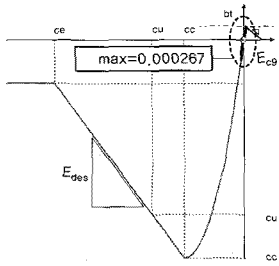
단면손상도



피복콘크리트



심부콘크리트



축방향철근

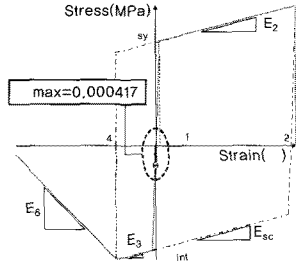
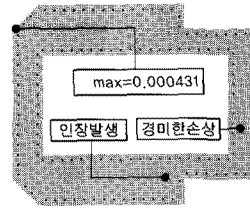


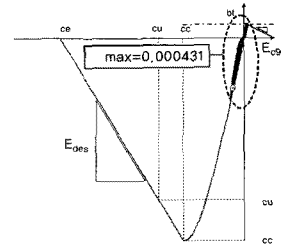
그림 27 Fiber Model ④ 해석결과

2.5.2 교축 직각방향 지진력 작용시

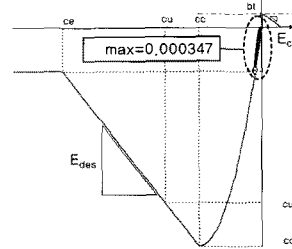
단면손상도



피복콘크리트



심부콘크리트



축방향철근

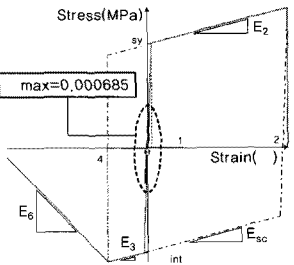
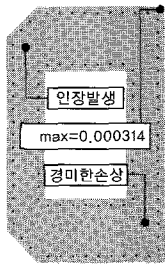
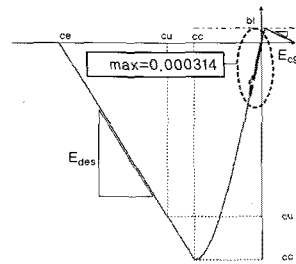


그림 29 Fiber Model ② 해석결과

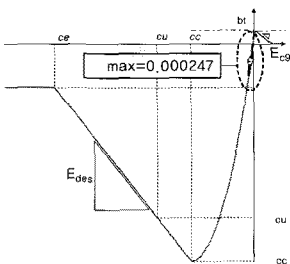
단면손상도



피복콘크리트



심부콘크리트



축방향철근

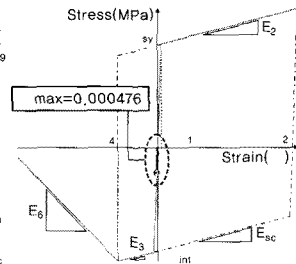
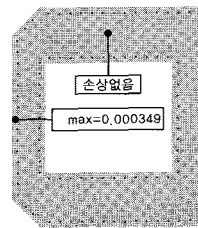
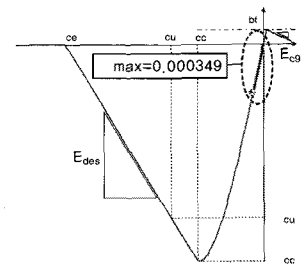


그림 28 Fiber Model ⑥ 해석결과

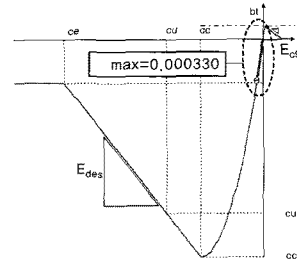
단면손상도



피복콘크리트



심부콘크리트



축방향철근

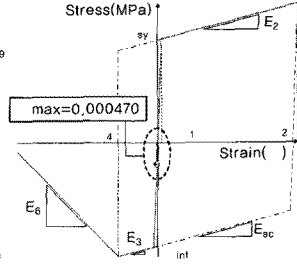


그림 30 Fiber Model ④ 해석결과

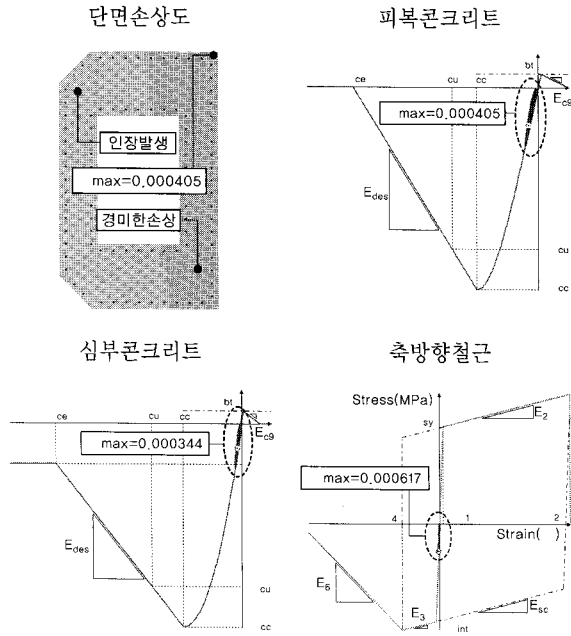


그림 31 Fiber Model ⑥ 해석결과

2.6 해석결과요약 및 검토결과

2.6.1 교축방향 지진력 작용시

표 1 Fiber Model ②

변형율 비교		피복	심부	철근
압축 ($\times 10^{-3}$)	ϵ_{min}	0.345	0.281	0.562
	ϵ_a	0.518	0.518	0.900
	판정	O.K	O.K	O.K
인장 ($\times 10^{-3}$)	ϵ_{max}	0.022	0.021	0.702
	ϵ_a	0.027	0.027	0.900
	판정	O.K	O.K	O.K

표 2 Fiber Model ④

변형율 비교		피복	심부	철근
압축 ($\times 10^{-3}$)	ϵ_{min}	0.279	0.267	0.417
	ϵ_a	0.518	0.518	0.900
	판정	O.K	O.K	O.K
인장 ($\times 10^{-3}$)	ϵ_{max}	0.014	0.014	0.468
	ϵ_a	0.027	0.027	0.900
	판정	O.K	O.K	O.K

표 3 Fiber Model ⑥

변형율 비교		피복	심부	철근
압축 ($\times 10^{-3}$)	ϵ_{min}	0.314	0.247	0.476
	ϵ_a	0.518	0.518	0.900
	판정	O.K	O.K	O.K
인장 ($\times 10^{-3}$)	ϵ_{max}	0.017	0.016	0.558
	ϵ_a	0.027	0.027	0.900
	판정	O.K	O.K	O.K

※ $\epsilon_{ca}=0.4f_{ck}/E_c$, $\epsilon_{ta}=0.13\sqrt{f_{ck}/E_c}$, $\epsilon_{sa}=f_{sa}/E_s$

2.6.2 교축 직각방향 지진력 작용시

표 4 Fiber Model ②

변형율 비교		피복	심부	철근
압축 ($\times 10^{-3}$)	ϵ_{min}	0.431	0.347	0.685
	ϵ_a	0.518	0.518	0.900
	판정	O.K	O.K	O.K
인장 ($\times 10^{-3}$)	ϵ_{max}	0.023	0.020	0.795
	ϵ_a	0.027	0.027	0.900
	판정	O.K	O.K	O.K

표 5 Fiber Model ④

변형율 비교		피복	심부	철근
압축 ($\times 10^{-3}$)	ϵ_{min}	0.349	0.330	0.470
	ϵ_a	0.518	0.518	0.900
	판정	O.K	O.K	O.K
인장 ($\times 10^{-3}$)	ϵ_{max}	0.020	0.017	0.731
	ϵ_a	0.027	0.027	0.900
	판정	O.K	O.K	O.K

표 6 Fiber Model ⑥

변형율 비교		피복	심부	철근
압축 ($\times 10^{-3}$)	ϵ_{min}	0.405	0.344	0.617
	ϵ_a	0.518	0.518	0.900
	판정	O.K	O.K	O.K
인장 ($\times 10^{-3}$)	ϵ_{max}	0.022	0.019	0.758
	ϵ_a	0.027	0.027	0.900
	판정	O.K	O.K	O.K

※ $\epsilon_{ca}=0.4f_{ck}/E_c$, $\epsilon_{ta}=0.13\sqrt{f_{ck}/E_c}$, $\epsilon_{sa}=f_{sa}/E_s$


3. 결 론

사장교를 Frame 및 Fiber모델로 구성하여 재료비선형 지진해석 수행하였다. 이 때의 입력지진파는 교량가설 지역의 지진가속도를 고려한 인공지진 시간이력을 이용하였으며, 비선형 재료특성을 고려한 Fiber Model은 피복 콘크리트, 철근의 횡구속 효과를 고려한 심부 콘크리트 및 축방향 철근 등 각각의 재료이력 모델(Hysteresis Model) 적용하였다. 해석결과를 토대로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 비선형 해석결과 교축 직각방향으로 큰 응답을 나타냈으며, 응력 검토결과 피복 및 심부 콘크리트에 경미한 손상이 예상되며 축방향 철근은 손상이 없는 양호한 결과를 나타냈다.

- 2) 재료비선형 단면해석 결과 Hysterisis Graph에서와 같이 콘크리트 및 철근의 거동이 탄성범위 이내이고 최대 변형율이 허용 변형율보다 작으므로 본 교량의 주탑은 충분한 내진성능을 보유하고 있음을 확인하였다.
- 3) 지진에 대한 취약부를 섬유요소로 모델링하고 재료의 소성영역까지 고려한 응력-변형율 이력함수를 부여하는 본 해석방법은 단면의 손상을 지진 진행중 육안으로 확인가능하여 내진안전성을 검토하는데 매우 효과적인 해석기법임을 확인하였다.

참 고 문 헌

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

[담당 : 유은종, 편집위원]