

고강도 콘크리트를 사용한 R/C 평면골조의 동적응답해석

Dynamic Response Analysis of R/C Frame Structures Using High-Strength Concrete

장극관*

황정현**

방세용***

Chang, Kug Kwan

Hwang, Jung Hyun

Bang, Se Yong

ABSTRACT

The purpose of this paper is to suggest an analytical technique for time history analysis of R/C frame structure using high-strength concrete under seismic loading. Current researches in hysteretic model of structural elements using high-strength concrete are not enough. It is the cause of error that apply hysteretic model of element using normal-strength concrete to the inelastic analysis of high-strength concrete R/C frame structures. In this paper time history analysis using IDARC and DRAIN programs was performed for a 2-bay, 20-story R/C frame structures. Particularly nonlinear dynamic analysis was performed by IDARC program that was applied hysteretic model of structural element using high-strength concrete. El-centro earthquake 1940 NS waves was used in the analysis and its peak ground accelerations are changed to be 0.12g, 0.25g

1. 서론

구조물이 고층화되면서 지진하중, 풍하중 등의 수평하중의 영향이 더욱 중요해졌으며, 강한 수평하중을 받는 구조물은 대부분 탄성한계를 넘어 비탄성 거동을 한다. 구조물의 비탄성해석에 의한 붕괴 직전까지의 비탄성 거동을 파악하는 것은 구조물의 연성설계와 강한기동 약한보의 일반적인 설계개념을 비선형 구간까지 확장하여 소성인지 발생여부를 확인하고 모멘트 재분배에 의한 경계성 있는 구조물의 설계를 도모할 수 있다. 따라서 내진설계시의 구조물의 연성능력 및 극한내력의 평가를 위한 비탄성해석의 필요성은 점차 증대되고 있다. 현재 지진하중에 대한 골조 구조물의 동적 비탄성 거동을 예측하는 일은 건물의 내진설계에 있어서 예비설계 단계에서 구조물의 충분한 연성도를 확인할 수 있

* 정희원, 서울산업대학교 건축공학과 부교수

** 서울산업대학교 건축공학과 연구원

*** 서울산업대학교 건축공학과 석사과정

고, 부재크기의 적절성, 소성힌지가 구조물의 일부에 집중적으로 발생하는 것을 예방하고 힌지분포를 적절하게 분산시켜서 부재에 발생하는 과대한 모멘트를 재분배 하는데 효과적이다. 또한 기존건물에 있어서는 예상되는 지진에 대한 부재의 보강여부를 결정하는데 유용한 수단이 되며 결국 구조물의 내진에 대한 전체적인 안전성 검토에 필수적이다. 그러므로 안정성 있는 동적 비탄성 거동을 예측하기 위해서는 신뢰성 있는 부재의 이력모델이 고려된 해석프로그램이 필수적이다. 현재 비선형 거동을 예측하는데 사용되는 프로그램은 IDARC⁽¹⁾와 DRAIN⁽²⁾ 프로그램 등이 보편적으로 사용되고 있고 일부 연구기관이나 기업체에서 자체 개발하여 사용되고 있으나 신뢰성이 검증되지 않은 상태이다. 기존 프로그램인 IDARC, DRAIN 프로그램은 내장되어 있는 이력모델이 매우 제한적이고 또한 일반강도 콘크리트 부재모델에 국한되어 있기 때문에 고강도를 사용한 구조물 해석시에 상당한 오차가 예상되며 따라서 이러한 해석값으로 구조물의 안정성을 판단하기에는 부적절하다고 할 수 있다. 현재 건물의 고층화에 의한 고강도 콘크리트의 사용이 일반화되는 추세임에도 고강도 콘크리트를 사용한 부재의 이력모델에 대한 연구는 미흡한 실정이며, 일반강도 콘크리트의 이력모델을 고강도 콘크리트를 사용한 골조의 동적해석에 부재 이력모델로 적용하는 것은 많은 오차의 가능성을 지니게 되는 것이다. 따라서 본 연구에서는 기존의 실험적연구⁽³⁾⁽⁴⁾를 통하여 얻어진 실험값을 토대로 Park의 이력모델의 이력변수를 수정한 수정모델을 사용하여 IDARC 프로그램으로 고강도 골조 건물을 해석하였고 그 결과를 기존모델을 사용한 IDARC 및 DRAIN 프로그램으로 해석한 결과와 비교 분석하였다.

2. 해석대상 구조물

해석대상 골조는 그림 1.에 보여진 바와 같은 20층 골조를 선정하여 부재설계 하였고 설계된 해석대상 골조의 단면형상과 배근상황은 표 1.에 정리하였다. 대상 건물은 우리나라 내진규준을 적용하여 서울지역을 기준으로 설계하였고, 사용된 콘크리트의 설계기준강도는 $f_{ck} = 640 \text{ kgf/cm}^2$ 이며 철근의 설계기준항복강도는 $f_y = 4000 \text{ kgf/cm}^2$ 이다.

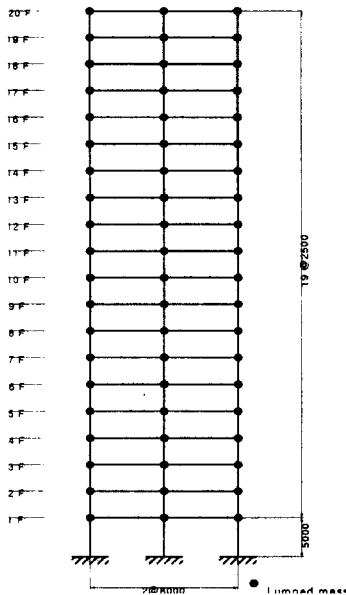


그림 1. 골조의 단면 및 집중질량의 이상화

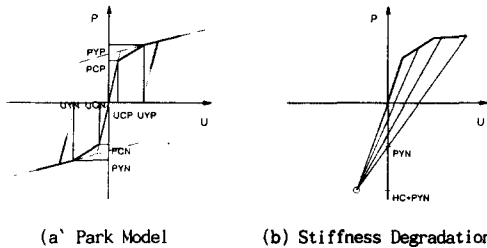
표 1. 부재 단면형상 및 배근상황

단면형상	부재	배근상황	
		단부	중앙부
	G ₂	TOP : 4-D22 BOT : 3-D22 STR : D10@150	TOP : 3-D22 BOT : 3-D22 STR : D10@250
	1-10C ₃	Main Bar : 20-D22 Hoop : D10 @300 Sub Hoop : D10 @300	
	11-15C ₃	Main Bar : 16-D22 Hoop : D10 @300 Sub Hoop : D10 @300	
	16-20C ₃	Main Bar : 8-D22 Hoop : D10 @300 Sub Hoop : D10 @300	
	11-20C ₄	Main Bar : 8-D22 Hoop : D10 @300 Sub Hoop : D10 @300	

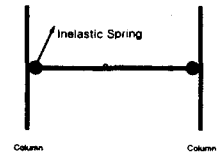
동적 비탄성해석을 위한 각종의 집중질량(Lumped mass)은 해석대상 구조물의 보-기둥 접합부에 분산 집중시켜 이상화하였으며 그림 1.은 해석대상 골조의 단면 및 집중질량의 분배된 모습을 나타내고 있다. 해석대상 골조의 고유주기, T 는 1.6088sec 이며 감쇠계수(Damping factor)는 구조물의 분배된 질량에 비례하는 감쇠율 6 %의 값을 사용하였다.

3. 부재의 이력모델

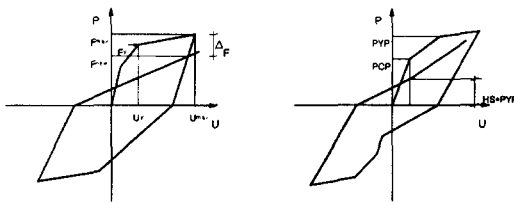
일반적으로 사용되는 비선형해석 프로그램, IDARC에 내장된 이력모델은 강성저하, 강도감소 및 핀칭 특성을 반영하는 이력변수로 한정되어 있다. DRAIN은 부재모델을 집중소성모델 및 분포소성모델을 사용할 때 사용자의 의도에 의한 적절한 비탄성 스프링의 모델링이 요구된다. 그동안 DRAIN을 사용한 보-기둥 접합부의 이력모델에 대한 연구의 대부분은 접합부의 전단변형 및 보 주근의 정착파괴를 모델링할 수 있는 연구가 수행되었으나 비탄성 스프링의 이력거동은 이력변수에 의한 조절이 불가능하기 때문에 접합부에 연결되는 비탄성 스프링에 의한 해석결과는 실험값과 비교해 상당한 차이를 보이고 있다. 그림 2.는 IDARC에서 적용되는 Park 이력모델 및 사용 가능한 이력변수를 보여준다. 그림 3.은 DRAIN에서 부재모델의 이상화 및 이력변수의 조절이 제한된 비탄성 스프링의 이력모델을 나타내고 있다. 골조의 시간이력해석을 수행하기 위한 부재 이력모델의 선정은 이미 수행된 보-기둥 접합부 실험에서 얻어진 실험값을 바탕으로 하여 구조체 이력모델을 추출하였으며 이를 통하여 얻어진 부재의 강성이력값으로 기존의 Park 이력모델을 수정하였다. 강성이력을 얻기 위하여 시도된 부분 구조체 해석모델링은 그림 4.에 도시된 바와 같고 해석치와 실험치와의 하중-변위 곡선, 강성저하 및 에너지소산 양에 대하여 실험값과의 비교는 그림 5.에 나타나 있으며 그림에서 보여진 바와 같이 매우 근사한 결과를 나타내고 있다.



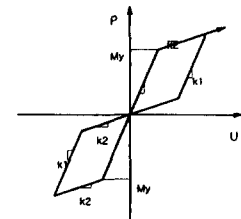
(a) Park Model (b) Stiffness Degradation



(a) Element Modeling



(c) Strength Deterioration (d) Pinching and Slip



(b) Inelastic Spring Behavior

그림 2. Park 이력모델 및 이력변수(IDARC)

그림 3. 비탄성 스프링의 이력모델(DRAIN)

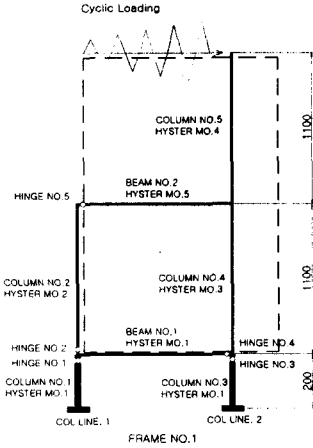
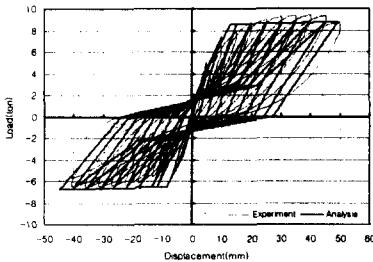


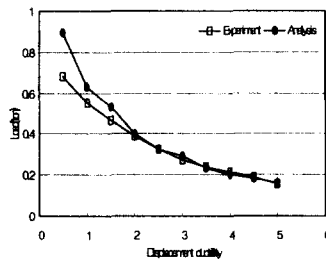
그림 4. HBC 수정 모델

표 2. 삼함수 이력모델의 이력변수

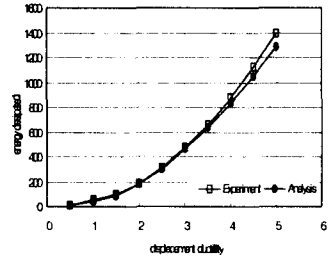
이력모델 \ 변수	강성저하	강도감소		핀칭
	α	β_1	β_2	γ
IDARC-수정	2	0.1	0.4	0.4
IDARC-기본	8	0.001	0.1	1.0



(a) Load-Displacement Relation



(c) Comparison of Stiffness



(C) Energy Dissipation Capacity

그림 5. 수정모델의 실험값과 해석값의 비교(HBC)

표 2.에서 IDARC-수정은 HBC 실험체를 해석시 정확하게 재현하기 위해 적용된 수정된 이력변수들의 값으로서 반복하중에 대한 고강도 콘크리트를 사용한 보-기둥 접합부의 이력거동 특성을 반영한다. 또한 IDARC-기본은 일반강도 콘크리트의 이력모델의 특성을 나타내며 IDARC에서 일반적으로 사용되는 이력변수의 값이다. 본 연구에서는 IDARC를 사용하여 위에서 제시한 두 가지 이력변수를 적용한 골조의 시간이력 해석을 수행하였으며 DRAIN에서는 그림 3.(b)에 비탄성 스프링을 보 단부에 모델링한 골조의 시간이력해석을 수행하였다.

4. 시간이력해석

시간이력해석에서 입력하중은 그림 6.에 도시된 El Centro 1940년 NS 성분의 지진파를 사용하였으며 최대수평가속도 값은 PGA=0.12g 및 PGA=0.25g 값으로 조절하여 사용하였다. 초기 15초까지 기록된 지진파를 해석에 사용하였으며 시간증분, $\Delta t=0.005$ 초 간격으로 하였다. 해석에 사용되는 부재모델의 특성에 따른 전체 건물의 거동 특성을 평가하기 위하여 본 연구에서는 고강도 콘크리트를 사용한 부재의 수정 이력모델과 보편적으로 사용하는 IDARC 및 DRAIN 프로그램에 내장된 이력모델을 사용한 해석결과를 비교하였으며 최대변위, 층간변위비 및 소성힌지 발생상태 등을 통하여 적합한 모델을 사용

하였을 때의 부재의 소성힌지의 발생상태와 파괴 메카니즘을 비교하였다.

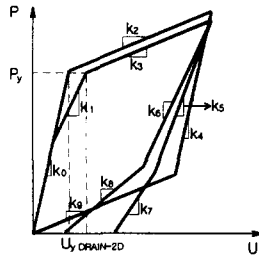
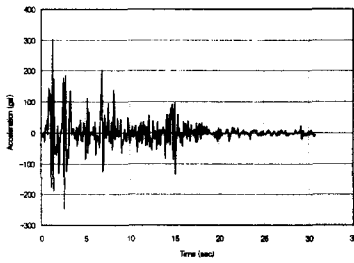


표 3. 선형구간에서의 강성값

구간 해석	초기 강성	균열	변형 경화	하중 제거	핀칭
DRAIN	k_0	-	k_2	k_4	k_9
IDARC-기본	k_0	k_1	k_3	k_5	k_7
IDARC-수정	k_0	k_1	k_3	k_6	k_8

그림 6. El-Centro Earthquake 1940 NS 그림 7. 이력모델의 거동특성

5. 해석결과와 비교분석

5.1 이력모델 특성비교

IDARC 및 DRAIN을 사용한 골조의 시간이력 해석에서 이력모델의 차이에 의한 세 가지 해석을 수행 하였으며 그림 7.은 세 가지 이력모델의 차이를 하중-변위 곡선상에 나타내고 있다. 또한 표 3.은 세 가지 이력모델이 그림 7.에 도시된 각 구간에서의 강성값에 의한 이력거동을 나타내고 있다. DRAIN에서 보의 이력모델은 균열특성이 고려되지 않는 이선형 모델로서 IDARC에서 적용된 이력모델에 비해 적은 변위에서 부재의 항복이 발생하며 변형경화 구간에서는 초기강성의 1/300의 강성값으로 세 가지 이력모델이 동일한 강성값을 나타낸다. DRAIN에서 하중제거시 강성값 k_4 는 탄성강성 k_0 와 같으며 강성저하 특성이 고려된 k_5, k_6 에 비해 많은 차이를 나타낸다. 이는 부재의 항복후 역전하중에 대한 저항성능을 과대하게 평가하는 결과를 나타나게 한다. 핀칭특성이 고려되는 구간에서 DRAIN의 강성값 k_9 는 원점을 지향하는 핀칭특성을 나타낸다. 고강도 콘크리트를 사용한 부재의 제안된 이력모델 (IDARC-수정)은 세가지 이력모델 중 하중제거시 강성저하 및 핀칭현상이 중요하게 고려되어야 함을 나타내며 이는 부재의 항복후 역전하중 작용시 작은 하중에 의해 큰 변위를 발생하게 한다. 반복하중에 대한 부재의 저항성능은 DRAIN, IDARC-기본 및 IDARC-수정 순서대로 크게 평가 되는 것을 확인할 수 있다.

5.2 동적응답의 비교

5.2.1 최대변위

비탄성 동적해석을 수행하여 얻어진 결과중 그림 8. 및 그림 9.는 PGA=0.12g 및 PGA=0.25g 일 때 각층의 최대변위값을 나타내었다. 그림 8.에서 일반강도 콘크리트의 이력모델 (IDARC-기본)을 적용한 골조의 최대변위가 다른 해석결과와 상당한 오차를 보이는 것을 알 수 있으며 DRAIN의 해석 결과에서는 저층에서 중층까지 비례적인 최대변위의 증가현상을 확인할 수 있다. 해석대상 골조는 PGA=0.12g 의 예상 지진하중에 대해 탄성설계 되었기 때문에 예상 지진하중 이상인 PGA=0.25g를 적용한 해석결과는 그림 9.에 도시한 바와 같이 최대변위가 대체적으로 비슷한 양상을 보였다. 이는 예상 지진하중의 한도를 벗어난 강진에 대해 골조의 부분부재인 보가 대부분 항복하여 부재의 이력모델에 의한 기여도가 낮아짐을 나타낸다.

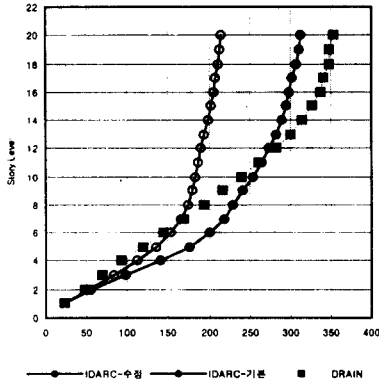


그림 8. 최상층의 최대수평변위 (PGA=0.12g)

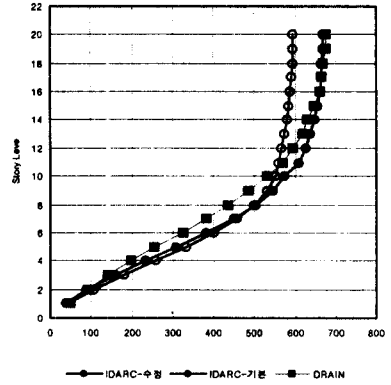
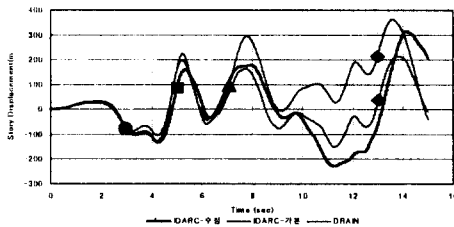


그림 9. 최상층의 최대수평변위 (PGA=0.25g)

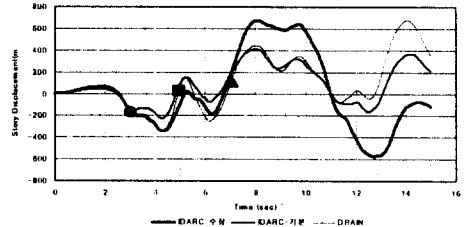
5.2.2 최상층 변위이력

그림 10. 및 그림 11. 은 PGA=0.12g 및 PGA=0.25g일 때 최상층의 변위이력을 나타내고 있다. 그림 10. 에서는 골조 부재의 항복이 시작된 3초 이전은 동일한 해석결과를 나타내며 부재의 항복이 활발히 진행된 7초 이후에는 골조에 속한 부재의 이력모델의 차이에 의해 최상층의 변위이력이 상이한 결과를 나타내고 있다. PGA=0.25g를 적용한 그림 11.의 해석결과에서 제안된 이력모델(IDARC-수정)을 적용한 골조의 해석결과가 다른 해석결과와 상당한 차이를 나타내었다. 골조의 최대수평변위의 비교에서 골조 각층의 최대변위응답은 PGA=0.25g로 증폭 적용할 때 비슷한 양상을 나타내었으나 예상 지진하중 보다 큰 강진일수록 골조의 동적응답은 최상층의 변위이력의 결과를 통해 부재의 항복이후 이력모델의 차이에 의해 상이한 거동을 나타내는 것을 알 수 있다. 소성힌지의 발생은 그림 10. 및 그림 11.에 도시된 바와 같이 골조의 저층에서 중층 고층으로 이동하며 집중적으로 발생하는 양상을 보였다. 이는 그림 14. 및 그림 15.에 나타낸 골조의 소성힌지 분포를 통해 확인할 수 있다.



Element Yielding Point (●: 3", ■: 5", ▲: 7", ◆: 13")

Fig. 10 최상층의 변위이력 (PGA=0.12g)



Element Yielding Point (●: 3", ■: 5", ▲: 7")

Fig. 11 최상층의 변위이력 (PGA=0.25g)

5.2.3 층간변위비

그림 12. 및 그림 13. 는 PGA=0.12g 및 PGA=0.25g일 때 각층의 층간변위비($\frac{\Delta d}{h_{xx}}$)를 나타내고 있다. 우리나라의 층간변위비의 제한값은 0.015로 제한하고 있으며 PGA=0.12g을 적용한 그림 12.에서는 세 가지 해석결과 모두 층간변위비의 제한값 이내에서 응답을 나타내고 있으나 제안된 이력모델(IDARC-수정)을 적용한 해석결과는 제한값의 한계치에 근접한 0.0124의 층간변위비를 나타내며(4층) 다른 해

석결과와 비교할 때 0.003 이상 차이를 보이고 있다. PGA=0.25g를 적용한 그림 13.에서는 모든 해석 결과에서 제한값인 0.015의 층간변위비를 중 저층에서 모두 초과하고 있으며 제안된 이력모델(IDARC-수정)을 적용한 해석결과와 최대층간변위비는 4층에서 0.0245로서 다른 해석결과와 비교할 때 0.0017 이상의 차이를 나타낸다. 이는 PGA=0.12g를 적용한 해석결과에 비해 줄어든 수치이며 각층의 최대수평변위의 해석결과와 같은 양상을 나타내고 있다. 또한 현행 내진설계 기준에 의해 설계된 골조가 예상할 수 있는 강진에 대해 상당히 취약한 것을 알 수 있다.

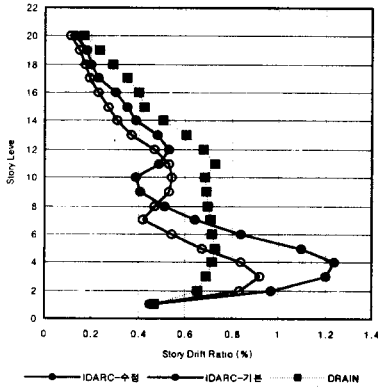


그림 12. 최대수평변위각 (PGA=0.12g)

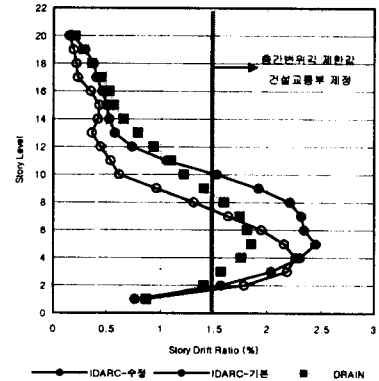
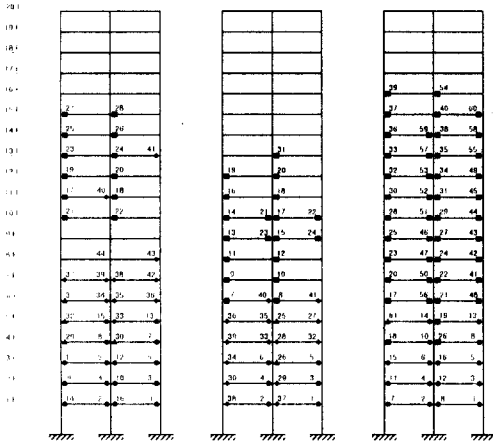


그림 13. 최대수평변위각 (PGA=0.25g)

5.2.4 소성힌지 분포

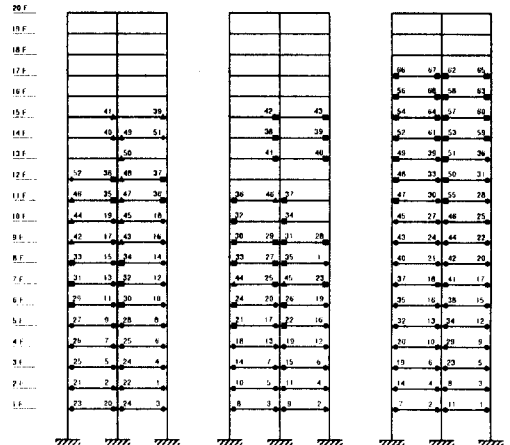
그림 14. 및 그림 15.는 PGA=0.12g 및 PGA=0.25g일 때 해석대상 골조의 소성힌지 발생분포 및 발생 순서를 나타내고 있다. 소성힌지는 그림 10. 및 그림 11.의 최상층의 변위이력에 표기한 3초, 5초, 7초 및 13초 해석 시간대에 집중적으로 발생하였으며 해석결과는 모두 저층에서 발생한 소성힌지가 중 고층으로 이동하는 양상을 보이고 있다. 그림 14.에서 해석 초기 소성힌지의 발생순서는 세 가지 해석모두 비슷한 결과를 나타내고 있으나 그림 14. (a) 제안된 이력모델(IDARC-수정)을 적용한 골조의 해석결과는 3초, 7초 및 13초에 발생한 소성힌지가 저층에 집중되어 그림 12.에서 볼 수 있듯이 저층에 상당한 층간변위비를 발생시킨 것으로 판단된다. 반면 일반강도 콘크리트의 이력모델(IDARC-기본)을 적용한 골조의 해석결과인 그림 14. (b)에서는 5초에 중층에 소성힌지가 집중적으로 발생하는 양상을 나타냈다. 그림 14. (c)에서 DRAIN의 해석결과는 중층에서 대부분의 소성힌지가 발생하였으며 이로 인해 그림 12.에서 저층 보다 중층인 11층에서 최대층간변위비가 발생하는 양상을 나타냈으며 소성힌지 발생 수는 다른 해석결과에 비해 대부분의 보가 항복하는 현상을 보였다. 이로 인해 그림 9.에서 볼 수 있듯이 최대수평변위비의 비교에서 최상층에서 가장 큰 변위응답을 나타낸 것으로 판단된다. PGA=0.25g를 적용한 해석결과인 그림 15.에서 세 가지 해석결과는 모두 3초 및 5초에 대부분의 소성힌지가 발생하는 양상을 나타냈으며 3초 해석 시간대에 저층에 집중적으로 소성힌지가 발생한 뒤 5초 해석시간대에 중 고층으로 소성힌지가 이동하여 집중적으로 발생하는 양상을 나타내고 있다. 설계 지진하중을 초과하는 강진에 대한 해석결과는 골조의 부분부재의 소성힌지 발생의 형태를 단순화 시키고 이력모델에 의한 동적응답의 기여도를 낮아지게 하는 것을 최대변위의 비교 및 최대층간변위비의 비교를 통해 알 수 있다. 반면 최상층의 변위이력의 비교에서는 강진에 대한 골조의 동적응답이

이력모델에 의해 크게 달라짐을 보여준다.



(a) IDARC-수정 (b) IDARC-기본 (c) DRAIN

그림 14. 소성힌지의 분포 (PGA=0.12g)



(a) IDARC-수정 (b) IDARC-기본 (c) DRAIN

그림 15. 소성힌지의 분포 (PGA=0.25g)

6 결론

고강도 콘크리트를 사용한 해석대상 골조에 대해 고강도 콘크리트 부재의 거동을 재현할 수 있는 이력모델(IDARC-수정)을 적용한 시간이력해석 및 일반강도 콘크리트의 이력모델을 적용한 시간이력해석을 기존의 비탄성해석 프로그램으로 널리 사용되는 IDARC 및 DRAIN을 사용하여 해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 부재 이력모델의 차이에 의한 구조물의 동적응답은 소성힌지의 발생상태 및 분포형태에 영향을 미치며 이는 구조물의 응답에 큰 영향을 준다.
- 2) 골조의 시간이력해석 결과 소성힌지는 특정 해석 시간대에 집중적으로 발생되며 본 연구에서 제안된 이력모델을 적용한 골조의 해석결과는 층간변위비의 비교에서 일부 층의 취성적인 거동으로 인한 파괴의 위험성 및 예상되는 강진에 대해 상당히 취약한 것으로 나타났다.
- 3) PGA=0.25g을 적용한 해석결과 설계 지진하중 이상의 강진에 대한 골조의 동적응답은 부재 이력 모델에 의한 영향이 줄어들며 최상층의 동적응답의 결과는 강진일수록 부분 부재의 항복이후 이력모델에 의해 골조가 상이한 거동특성을 보이는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술재단 특정기초(과제번호:97060201013) 및 한양대학교 초대형구조시스템 연구센터의 연구비 지원에 의해 이루어 졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) R. E. Valles, A. M. Reinhorn, S. K. Kunnath, C. Li, A. Mander, "IDARC2D : A Computer

Program for the Inelastic Damage Analysis of Buildings", University of New York at Buffalo, 1996.

- 2) V. Prahash, G.H Powell, S. Campbell, "DRAIN-2DX Base Program Description and User Guide Version 1.10", University of California Berkeley, 1993.11
- 3) 장극관, 서대원, "일반강도 및 고강도 재료를 사용한 보-기둥 접합부의 지진응답", 한국지진공학 회 논문집. 제 3권. 제 4호, 1999. 12, pp 83-94
- 4) 장극관, 서대원, "고강도 콘크리트를 사용한 보-기둥 접합부의 전단강도", 콘크리트학회지 제 12 권 2호, 2000. 4, pp 53-61
- 5) Amador Teran-Gillmore, Vitelmo V. Bertero, "Performance of Tall Buildings During The 1985 Mexico Earthquakes", University of California at Berkeley, 1992. 9, pp 67-209
- 6) Christian Meyer, "Modeling and Analysis of Reinforced Concrete Structures for Dynamic Loading", CISM, Udine, 1998, pp.65-106
- 7) Glenn M. Marquis, "Effect of High-Strength Concrete on The Seismic Response of Concrete Frame", McGill University, 1996. 6, pp 1-8