

철근콘크리트와 철골조로 이루어진 혼합구조보의 비선형 이력거동에 관한 연구

Nonlinear hysteretic behavior of hybrid beams consisted of reinforced concrete and steel

이 은 진* 김 옥 중** 문 정 호*** 이 리 형****
Lee, Eun-jin Kim, Ook-jong Moon, Jeong-ho Lee Li-hyung

ABSTRACT

This paper describes an analytical study on nonlinear hysteretic behavior of hybrid steel beam with reinforced concrete ends. Two types of analytical model, Polygonal Model[PM] and Hybrid Model[HM], were used to represent the nonlinear hysteretic behavior. PM used three parameters, HM used an additional parameter to consider the initial stiffness reduction. The parameters calibrated comparing the hysteretic performance obtained from experiments. The purpose of this study is to develop an analytical model which can take into account the initial stiffness reduction of the hybrid members and to represent exactly the hysteretic performance for the hybrid structures with RC and steel. The analytical study showed PM tends to overestimate initial stiffness and strength. However, HM which is capable to consider the initial stiffness reduction gave good prediction on initial stiffness, post-yielding performance, strength, pinching response and so on.

1. 서론

최근 미국, 일본 등 선진국을 중심으로 복합구조에 대한 관심이 높아지면서, 여러 가지 합성부재나 혼합구조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 철근콘크리트구조와 철골구조의 장점을 적절히 이용할 수 있는 복합화 공법은 매우 효율적인 구조 시스템이라 할 수 있으며, 현재 여러 각도에서 연구가 진행되고 있다. 이러한 복합화 공법의 하나로 개발된 단부 RC조, 중앙부 철골조로 이루어진 혼합구조보는 RC조의 경제성과 철골조의 경량화 및 장스팬 확보라는 장점을 적절히 활용하면서, PC화로 인한 공기단축, 구조물의 고품질화, 인력절감 등의 효과를 기대할 수 있다. 현재 국내에서도 이러한 혼합구조보에 대한 연구는 몇몇 실험과 이론적인 연구를 기반으로 적용의 초기단계에 있으나, 적절한 해석방법과 성능 평가에 대한 연구는 현저히 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 혼합구조보로 이루어진 건물의 내진성능 해석 평가 모델을 개발하기 위하여 혼합구조보의 거동을 거시적 모델(macroscopic model)로 이상화하여 이력특성을 평가하고자 하였다.

* 한양대학교 건축공학과 대학원 석사과정

** 한양대학교 건축공학과 대학원 박사과정

*** 한남대학교 건축공학과 교수, 공학박사

**** 한양대학교 건축공학부 교수, 공학박사

먼저 한양대학교⁹⁾에서 수행되어진 실험체에 대해 철근콘크리트 구조물의 비선형 해석 프로그램인 IDARC2D를 사용하여 Quasi-static 해석을 수행하고, 그 결과들을 비교하였다. 해석은 3가지 계수를 이용하는 Polygonal model(이하 'PM'이라 한다), 혼합구조보에 대한 이력 특성을 좀더 상세히 반영할 수 있도록 본 연구에서 1가지 요소를 추가·수정한 Hybrid model(이하 'HM'이라 한다)로 수행하였다.

2. 대상 실험체 개요

본 연구에 사용된 연구대상 모델은 국내 P건물을 대상으로 구조해석을 실시하여 응력이 가장 많이 발생하는 지점을 선정 한 후, 1/2축척으로 제작된 실험체이다.(그림 2.1참조) 실험체는 RC+S부분의 거동을 알아보기 위해 설계되었으며, RC 및 RC+S부분의 인장철근량과 철골의 크기가 변수로 선정되었다. 가력방법은 부재각(R)에 따라 1/300부터 1/15까지 단계별로 2Cycle씩 반복가력하였다. 실험체 일람 및 실험결과, 재료실험 결과 및 하중가력방법 등은 표2.1, 표2.2 및 그림2.2에 나타내었다.

표 2.1 실험체 일람 및 실험결과

실험체명	인장철근량(mm ²)	단면 폭(mm)	단면 길이(mm)	철 골	최대강도(t)	파괴모드
GA	3,370	330	580	H-350X175X7X11	13.2	전단(RC+S)파괴
GB1	2,122	330	580	H-350X175X7X11	11.5	휨+전단(RC+S)파괴
GB2	1,548	330	580	H-350X175X7X11	9.4	휨(RC+S)파괴
GB3	3,370	330	580	H-346X174X6X 9	12.3	휨(STEEL)파괴

표 2.2(a) 콘크리트 재료실험 결과

콘크리트	설계강도 (kg/cm ²)	실험시강도 (kg/cm ²)	탄성계수(Ec) (kg/cm ²)
	400	444	1.7X10 ⁹

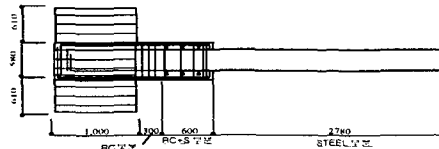


그림 2.1 혼합구조보 상세도

표 2.2(b) 철근 및 철골 재료실험 결과

종류	항복강도 (kg/cm ²)	극한강도 (kg/cm ²)	탄성계수 (kg/cm ²)	변형경화율 (%)	
철근	D19	4,445	6,523	1.81X10 ⁶	0.2
	D22	4,085	6,206	2.09X10 ⁶	0.2
철골	11mm	3,297	4,845	1.93X10 ⁶	0.2
	7mm	3,712	5,082	2.01X10 ⁶	0.2
	9mm	3,613	5,058	1.81X10 ⁶	0.2
	6mm	4,077	5,138	2.21X10 ⁶	0.2

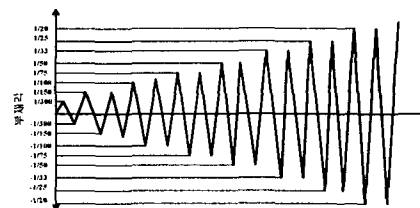


그림 2.2 하중가력방법

3. 해석 모델

일반적으로 구조해석 모델은 재료의 구성방정식을 사용하는 미시적 모델(microscopic model)과 전체적인 거동을 예측하기 위한 거시적 모델(macrosopic model)로 구분될 수도 있다. 미시적 모델은 부분적인 응력과 변형의 상태를 파악하는 경우에 효과적이고, 거시적 모델은 간단한 이상화에 의해 전체적인 거동의 특성을 평가할 수 있다. 본 연구에서는 구조체 전체적인 거동 특성을 연구하기 위하여 IDARC2D를 이용한 근사 해석법으로 해석을 수행하였다.

3.1 재료 모델

IDARC2D에서 사용되고 있는 콘크리트 모델은 Kent와 Park에 의해 제안된 모델로 횡 보강근에 의한 구속 정도를 고려할 수 있는 그림 3.1과 같은 응력-변형도의 관계를 설정하고 있다. 제안된 곡선은 콘크리트의 구속 정도와 관계없이 최대강도를 공시체의 최대 압축강도인 f'_c 와 같다고 하고 있으며, 이때의 변형을 역시 구속여부에 관계없이 0.002로 하고 있다. 또한 최대 강도이후 하강부분을 직선으로 나타내고 있으며, 하강 직선의 기울기를 조정하여 횡 보강근의 구속 효과를 반영하고 있다. 철근 및 철골은 그림 3.2에서 보는 것과 같이 변형경화 구간에서 응력-변형도 관계가 선형으로 가정된 모델을 사용하였다.

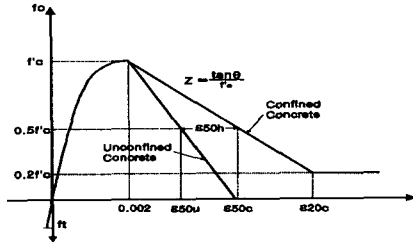


그림 3.1 콘크리트 모델

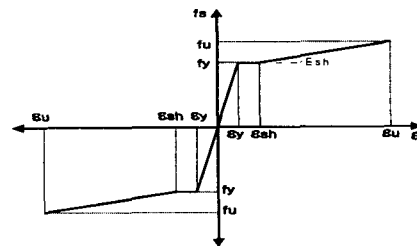


그림 3.2 철근 및 철골 모델

3.2 이력거동 모델

실험에서 관찰된 혼합구조보의 이력거동 특성은 주로 RC부분 및 RC+S부분의 거동에 영향을 받는다. 따라서 RC구조물의 이력 거동 특성인 강성저하, 강도저하, 핀칭현상 등이 나타났다. 또한 RC부분에서 철골이 미끄러져 나와 분리됨으로써 탄성구간에서부터 단면이 가지는 강성을 충분히 발휘하지 못하여 전체 강성이 저하되고 변위가 증가되는 현상을 보였다.

이러한 혼합구조의 이력 거동은 다음에 설명되는 4가지 현상으로 표현할 수 있으며, 4가지 이력현상을 고려하기 위하여 4가지의 계수가 이용되었다. 본 연구의 PM에서는 강성저하, 강도저하, 핀칭거동 모델을 사용하였고, HM에서는 이 3가지 모델에 부재의 초기강성 감소모델을 추가하여 해석하였다. 그리고 각각의 적용방법은 다음과 같다.

① 강성 저하(그림 3.3) : 재료의 성질상 탄성범위를 벗어난 재료는 균열이나 소성변형 등으로 급격히 강성이 감소되는 현상이 나타나게 된다. 강성저하 모델은 모든 재하(unloading)강성이 αF_y 를 향하도록 하며, 이때의 강성 k^* 는 식(1)과 같다.

$$k^* = \frac{(M_{\max} - \alpha M_y)}{(\phi_{\max} - \alpha M_y / k)} \dots \dots \dots (1)$$

여기서 M_{\max} 와 ϕ_{\max} 는 각각 재하사이클(unloading cycle) 시작점에서의 모멘트와 곡률값이고, α 는 강성저하의 양을 결정하는 조절계수이다. 또한 M_y 는 항복모멘트, k 는 단면의 초기강성(EI)이다.

② 강도 저하(그림 3.4) : 재료의 성질상 최대강도 또는 극한강도에 도달한 이후, 또는 부재의 손상으로 인해 전체 부재의 강도저하가 발생하게 된다. 최대 모멘트 M_{\max} 이후의 재재하(reloading)시 M_{\max} 대신 새로운 M_{new} 로 향하게 하여 강도저하를 표현하며, β 는 식(2)와 같다.

$$\beta = \left(\frac{d\Phi_m}{\Phi_u} \right) \div \frac{dE}{\Phi_u M_y} = \frac{\Phi_m}{dE} \dots \dots \dots (2)$$

여기서 dE 는 표준화된 증가 이력에너지이고, Φ_m 은 최대 반응의 증가로 인해 발생하는 증가 손상을 말하며, β 는 이력에너지의 감소율을 조절하는 계수이다.

③ 편칭 거동(그림 3.5) ; 콘크리트의 균열이 열리고 닫히는 현상 및 철근의 재결속 등으로 생기는 편칭현상도 이력거동에서 나타나는 중요한 특징이다. 이러한 편칭 거동은 제하(unloading) 및 재재하(reloading)사이클에서, 하중-변위 곡선이 slip축을 가로지를 때, 식(3)에 따르는 새로운 목표점을 향하게 된다.

$$M^* = \gamma M_y \dots \dots \dots (3)$$

여기서 γ 는 항복모멘트 M_y 의 함수로 표현되는 편칭의 정도를 표현하는 조절계수이다.

④ 부재의 초기 강성 감소 ; 이 특성은 혼합구조에서 자주 나타나는 현상으로 콘크리트와 철골의 분리에 의해 전체 부재의 초기 휨강성이 감소되는 현상이다. 해석결과(PM), 순수RC구간의 초기 강성은 STEEL구간의 강성에 비해 비교적 잘 맞는다. 이는 RC+S부분에서 철골의 미끄러짐으로 인하여 초기 강성 감소가 일어남을 의미한다. 본 연구의 대상 실험에서 철골의 미끄러짐을 측정한 LVDT값은 최대강도 발현시까지 탄성적으로 증가함을 알 수 있다.(그림3.6) 거동 초기부터 감소된 강성으로 시작된 이력현상은 부재가 항복강도에 도달한 이후에는 다른 여러요인으로 인한 강성 및 강도저하 현상이 일어나므로, 미끄러짐으로 인한 강성감소의 정도가 상대적으로 줄어들게 되어 무시할 수 있을 정도의 양이 된다. 따라서 초기 강성 감소 계수 ϵ 은 slip량에 의해 표현할 수 있으며, 본 연구대상 실험체의 slip/load값 및 ϵ 과의 관계는 각각 표3.1 및 그림3.7에 나타내었다. 초기강성 감소모델은 그림3.8과 같고, 감소된 초기 강성은 식(4)에 따른다.

$$k_e = \epsilon k \dots \dots \dots (4)$$

여기서 ϵ 은 혼합구조보에서 철골의 미끄러짐으로 인한 초기 강성의 감소를 조절하는 계수이고, k 는 원래의 초기강성, k_e 는 감소된 강성을 나타낸다.

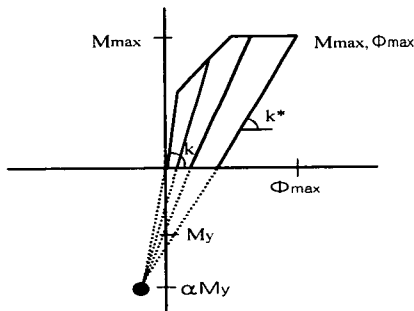


그림 3.3 강성저하 모델

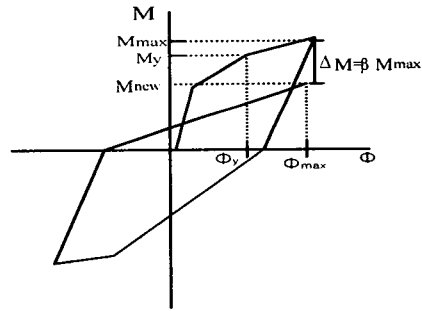


그림 3.4 강도저하 모델

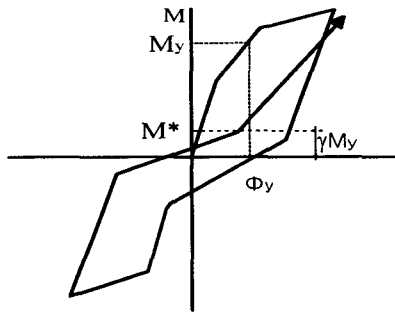


그림 3.5 펀칭 모델

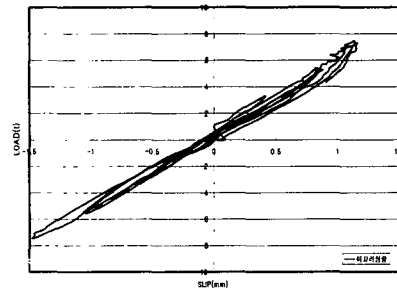


그림 3.6 철골의 미끄러짐값

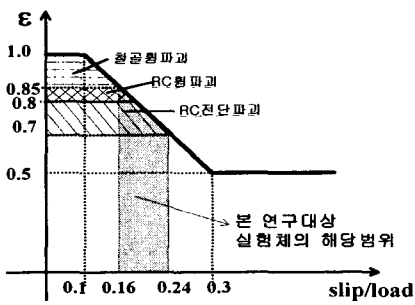


그림 3.7 초기강성감소계수

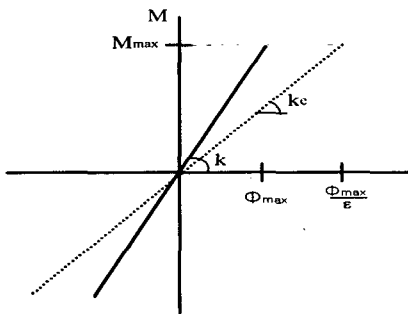


그림 3.8 초기강성감소 모델

표 3.1 미끄러짐과 ϵ

실험체명	미끄러짐량 (Slip/load)	ϵ	파괴모드
GA1	0.24	0.68	전단파괴(RC+S)
GB1	0.23	0.71	휨+전단파괴(RC+S)
GB2	0.18	0.80	휨파괴(RC+S)
GB3	0.16	0.86	휨파괴(STEEL)

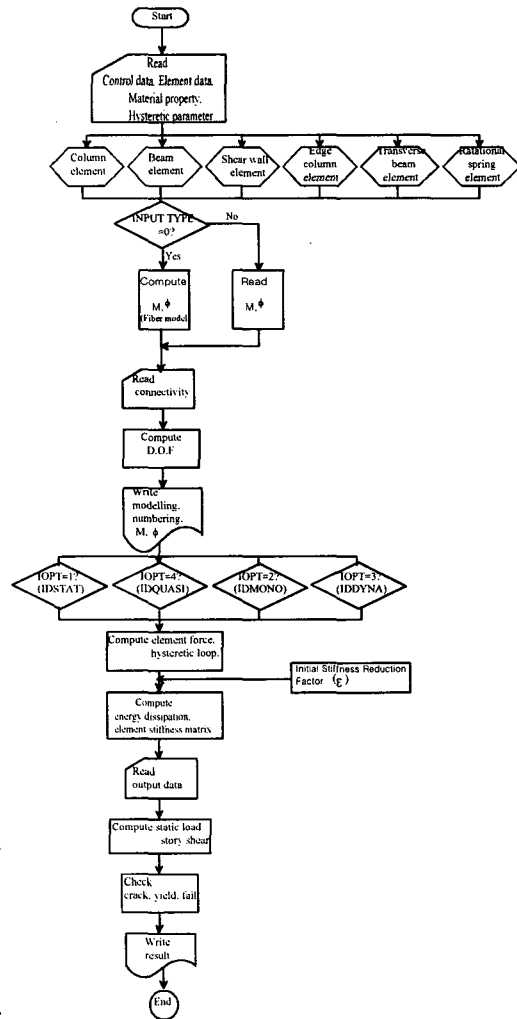


그림 3.9 해석 연구 흐름도

3.3 혼합구조보 모델

그림 3.9는 본 해석에 대한 흐름을 나타낸 흐름도이다. 본 연구의 모델은 그림 3.10와 같이 순수 RC부분, RC+S부분, 순수 STEEL부분을 가지는 3개의 보요소로 모델링하였으며, 모멘트와 곡률 등의 계산은 Fiber Model로 이루어졌다. 그런데 각 fiber에 의해 계산된 전체 부재의 강성은 각 부재의 휨 및 전단변위에 대한 강성을 고려하지 못하기 때문에 기존연구¹⁾에서 제안된 강성값을 사용하였다. 이력거동모델의 계수 4가지에 대한 최종적인 선택은 사이클당 예상되는 강도, 강성 및 에너지 소산량과 실험에서 얻어진 값 사이의 오차를 최소화할 수 있도록 하였다.

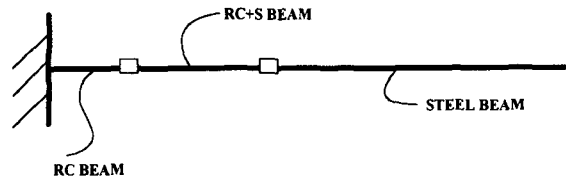


그림 3.10 혼합구조보 모델

4. 혼합구조보의 Quasi-static 해석결과

그림 4.1은 GB1실험체에 대한 실험결과와 PM 및 HM결과를 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림 4.2는 강성 및 강도비교를 그래프로 표현한 것이며, 그림 4.3은 부재각에 따른 에너지 소산량을 표시한 그림이다.

4.1 강성

대부분의 결과, PM은 초기강성을 과대평가함으로써 초기 강도 또한 크게 예측하고 있음을 알 수 있다. PM은 초기강성에서 32~95%까지 과대평가하는 반면, 초기강성 감소 모델을 사용한 HM은 2~31%오차를 보이며, 우수한 예측을 하였다.(그림 4.2, 표4.2) 항복 이후의 강성은 강성저하 모델에서 제시하는 계수 $\alpha=1.0-2.0$ 을 사용하면 적절히 평가되었다.

4.2 강도

항복강도는 HM의 경우 10%범위 내에서 매우 우수한 예측을 하며, 최대 내력 역시 15%의 범위내에 있었다. GA1 실험체의 경우는 RC부분 및 RC+S부분에 철근이 과다배근되어 전단파괴로 유도한 실험체이므로 다른 실험체에 비해 예측능력이 상대적으로 낮아졌다. 휨파괴의 경우는 3~12%정도 과대평가되고 있으며, 전단파괴의 경우는 과소평가(15%)되었다.(표4.1) 강도에서 과소 또는 과대평가되는 부분에 대해서는 에너지 소산량으로 상쇄되도록 하였다.

4.3 이력곡선

각 실험체의 이력곡선은 강성저하계수(α), 강도저하계수(β), 핀칭계수(γ)에 의해 조절되며, 철근콘크리트와 철골부분에 대해 각각 정의된다. 초기에는 RC부분의 영향을 받으므로 주로 철근콘크리트 특성이 전체 부재에 반영되며, 항복 후 파괴에 이르기까지는 GA1은 RC 및 RC+S부분에 의해, GB3는 STEEL부분에 의한 영향을 받는다. 강성저하의 경우, GA1 및 GB3는 GB1 및 GB2보다 큰 값이 설정되었으며, 이는 강성저하가 덜 일어남을 의미한다. GA1은 과다배근으로 인한 휨성능 향상으로, GB3는 철골선형 항복형으로 역시 RC부분의 성능이 상대적으로 우수하기 때문이라 사료된다. GB1과 GB2는 일반적인 RC 휨거동과 비슷한 계수가 사용되며, GB3는 철골 휨 항복형으로 철골에 의한 강성저하현상이 다른 실험체보다 크게 나타나고, 반대

로 편칭은 거의 무시할 정도의 계수(0.9)가 사용되었다. (표4.3)

4.4 에너지 소산능력

에너지 소산능력은 연성능력과 밀접한 관계를 가지며, RC부재보다 STEEL부재에서 월등히 우수하게 나타나는 것이 일반적이다. 본 연구결과에서도 철골항복형 실험체인 GB3에서의 에너지 소산량이 상당히 크게 측정되었다. 또한 전체적으로 최대내력에 도달하기 전까지는 30%정도의 오차를 보이며, 최대내력 이후에는 큰 차이를 보이게 된다. 이는 해석상 최대내력에 도달한 이후에도 강도가 계속 증가하는 모델을 이용하기 때문이라고 판단된다.(그림4.3)

4.5 초기강성 감소계수 적용

본 연구에서 사용된 초기강성감소계수(ϵ)는 대상 실험에 의한 철골의 미끄러짐량에 대해 0.68~0.86을 설정하여 해석모델에 사용하였다. 여기서 철골의 미끄러짐량은 RC+S부분의 $\mu M_p^{(5)}$ 에 의해 결정되며, μM_p 값은 또한 인장철근량에 의한 파괴모드에 영향을 받는다. 따라서 혼합구조보에서 ϵ 의 적용은 파괴모드에 따라 전단 파괴는 0.7, RC부분 휨파괴의 경우는 0.8, 철골 휨파괴의 경우는 0.85의 값이 적절함을 알 수 있었다.(표4.3)

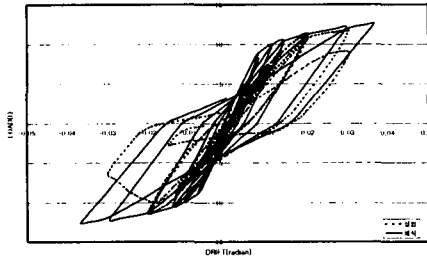


그림 4.1(a) GB1의 실험-해석(PM)

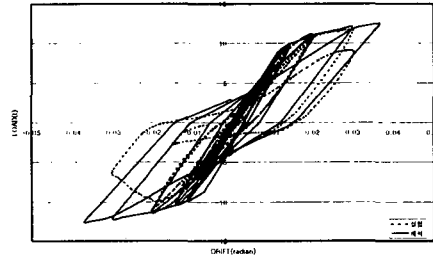


그림 4.1(b) GB1의 실험-해석(HM)

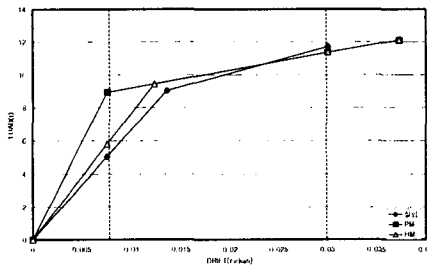


그림 4.2 GB1의 강성 및 강도 비교

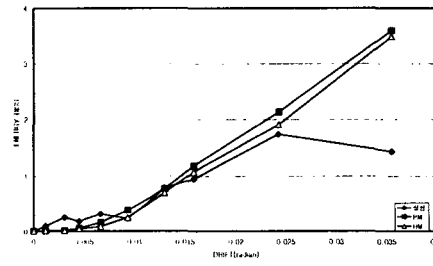


그림 4.3 GB1의 에너지 소산량 비교

표 4.1 항복값, 최대내력 비교

실험체명	항 복 부 재 각 (radian)			항 복 강 도 (ton)			최 대 내 력 (ton)		
	실 험	해 석(HM)	해 석/실 험	실 험	해 석(HM)	해 석/실 험	실 험	해 석(HM)	해 석/실 험
GA1	0.0147	0.0112	0.76	10.4	10.2	1.02	13.2	11.16	0.85
GB1	0.0141	0.0129	0.92	10.0	10.1	1.01	11.5	12.1	1.05
GB2	0.0130	0.0127	0.97	8.45	8.52	1.01	9.4	10.5	1.12
GB3	0.0144	0.0130	0.90	10.2	11.1	1.09	12.3	12.7	1.03

표 4.2 초기강성 비교

실험체명	초기강성 (ton/radian)				
	실험	해석(PM)	해석(HM)	해석(PM) /실험	해석(HM) /실험
GA1	721.96	1,413.71	950.47	1.95	1.31
GB1	665.93	1,184.03	766.66	1.77	1.15
GB2	710.89	945.75	726.55	1.33	1.02
GB3	670.55	889.71	747.24	1.32	1.11

표 4.3 이력거동계수 비교

실험체명	α	β	γ	ϵ	제안 ϵ	
콘크리트	GA1	2.0	0.2	0.2	0.68	0.70
	GB1	1.0	0.1	0.5	0.71	0.70
	GB2	1.0	0.1	0.5	0.80	0.80
철골	GB3	2.0	0.1	0.5	0.86	0.85
	GA1	4.0	0.01	0.7	0.68	0.70
	GB1	4.0	0.01	0.7	0.71	0.70
철골	GB2	4.0	0.01	0.7	0.80	0.80
	GB3	5.0	0.01	0.9	0.86	0.85

5. 결론

- ① 강성저하 변수 α 는 RC부분에 대해 1.0~2.0, 철골부분에 대해서는 4.0~5.0로 나타나 RC부분이 2~5배가량 강성저하현상이 심하게 나타났다.
- ② 항복강도 및 최대강도는 15% 범위 내에서 우수한 예측을 하며, 강도저하 계수 β 는 RC부분에 대해 0.1~0.2, STEEL부분에 대해 0.01로 나타나 STEEL부분에서의 강도저하 현상은 거의 무시할 정도의 수준이다.
- ③ 펀칭 현상이 거의 일어나지 않는 철골 선형 항복형은 에너지 소산능력이 뛰어나며, 전체적으로 30%정도의 차이를 보였다. 또한 최대내력 이후의 큰 차이는 강도가 계속 증가하는 철근 및 철골재료 모델을 사용하기 때문이다.
- ④ 초기강성 감소 모델을 반영한 Hybrid Model은 초기강성 감소 조절 계수 ϵ 을 사용하여 철골 미끄러짐으로 인한 초기강성 감소를 적절히 고려할 수 있으며, 파괴모드별로 RC부분 전단파괴는 0.7, RC부분 휨파괴는 0.8, 철골부분 휨파괴는 0.85로 하는 것이 적절하다.

감사의 글

본 연구를 지원한 한양대학교와 초대형 구조 시스템 연구센터의 지원에 깊이 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김육중, 최종권, 문정호, 이리형, 이동렬, "단부 RC조와 중앙부 철골조로 이루어진 혼합구조보의 전단내력에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 1998년 11월
2. G. S. Cheock, W. C. Stone, S. K. Kunnath, "Seismic Response of Precast Concrete Frames with Hybrid Connections", ACI Structural Journal, September-October 1998, pp. 527~539
3. Magdy T. El-Sheikh, Richard Sauce, Stephen Pessiki, Le-Wu Lu, "Seismic Behavior and Design of Unbonded Post-Tensioned Precast Concrete Frames", PCI Journal, May-June 1999, pp. 54~71
4. 박천석, 이상호, 윤성기, "비선형 유한요소해석에 의한 복합구조 접합부의 전단강도에 관한 연구", 대한건축학회논문집 13권11호 통권 109호 1997년 11월 pp. 399~410
5. "HI-Beam을 이용한 복합화 공법의 개발 및 성능평가", 삼성물산(주)건설부문 & 한양대 초대형구조시스템 연구센터 연구보고서(1998)
6. R. E. Valles, A. M. Reinhorn, S. K. Kunnath, C. Li, A. Madan, "IDARC2D : A Computer Program for the Inelastic Damage Analysis of Buildings", Technical Report NCEER-96-0010, June 1996