SRC 합성교각의 비탄성 거동

Inelastic Behavior of the SRC Column

정인근* 민진** 심창수*** 정영수***

Jung, In Keun Min, Jin Shim, Chang Su Chung, Young Soo

ABSTRACT

Steel Reinforced Concrete (SRC) composite column has several advantage such as excellent durability, rapid construction, reduction of column section. Due to these aspect, applications of SRC columns to bridge piers are continuously increasing. For the design of relatively large SRC columns for bridge piers, it is necessary to check the current design provisions which were based on small section having higher steel ratio. In this study, seven concrete encased composite columns were fabricated and static tests were performed. Embedded steel members were a H-shape rolled beam and a partially filled steel tube. Based on the test results, the ultimate strength according to section details and local behavior were estimated. For the analysis of inelastic behavior of the SRC column, the cracked section stiffness of the columns was evaluated and compared with calculations. The stiffness of the cracked section showed that 25% of the initial value and this stiffness reduction occurred at 85% of the ultimate load in the experiments.

1. 서론

SRC합성기둥의 기능성과 미관에 대한 욕구가 높아지면서 국내에서도 도심내 경량전철 하부구조와 고가도로의 교각 등에 대하여 필요성이 급속히 증가되고 있는 추세이다. 국내에서는 1993년 합성기둥에 대한 해석과 국내외 기준 비교에 대한 분석[1] 등 관심을 기울이기 시작하였으며, 1990년 말에 들어서는 합성기둥의 좌굴강도와 거동에 대한 실험적 연구가 이루어지기 시작했다. 이후 2000년에 들어와서 Reinforced Concrete(RC)기둥의 내진 성능개선[2]과 더불어 콘크리트를 충진한 합성기둥의 거동과 성능에 관한 실험과 해석이 지속되어 수행 되었다. 그 예로서는 SRC기둥의 형강보 접합부의 전단강도 및 거동에관한 연구[3]와 SC(Steel Concrete)합성기둥의 합성효과에 의한 강성 및 연성에 대한 성능평가에 관한연구[4]와 일정한 축하중과 반복적인 횡하중을 받는 콘크리트 충전 강합성기둥의 연성 평가에 따른 내진성능에 관한 실험적 연구[5]가 수행되었다. 외국의 경우 1990년에 들어와서 복합소재와 튜브 강재 등 합성단면에 대한 구조적 거동과 내화성, 연성도 등 기둥의 성능향상을 위한 연구와 더불어 수치해석을 수행하는 중에 있으며[6], C.C. Weng과 S.I.

* 중앙대학교 건설환경연구소, 연구원
** 중앙대학교 토목공학과, 석사과정
*** 정회원 · 중앙대학교 토목공학과, 교수

Yen[7]에의해서 기존의 SRC합성기둥에 대한 실험결과들을 AISC-LRFD 기준 및 ACI-318 기준과 비교하여 강도 및 휨성능에 대한 비교분석을 수행하기도 하였다. 이에 따라서, SRC합성기둥의 강도와 거동 및 연성도 등 기존의 연구를 통해서 축적되어진 연구를 바탕으로 합성기둥의 비탄성 거동에 따른 강성변화의 변화를 분석함으로서, SRC합성기둥의 성능에 관한 보다 구체적인 기준을 마련하는데 근거로 삼을 수 있도록 하였다.

2. 실험상세

2.1 실험개요

H형강이 매입된 합성기둥 5기와 소성힌지 구간에 콘크리트가 부분충진된 원형 강관이 매입된 합성기둥 2기를 포함해서 총 7기의 SRC 합성기둥의 단면특성에 따른 휨강도,에 대해서 순수휨 상태와 휨-압축 상태의 단조정적실험을 수행하였다. SRC합성기둥의 단면특성에 따른 휨 강도, 변형능력, 각국의 시방서 기준에 따른 P-M상관관계는 기존의 연구[8],[9]를 통하여 제시하였으며, 변형후의 단면은 평면을 유지한다는 가정하에 실험결과를 통해서 휨 강성에 대한 평가를 수행하였다.

합성기둥의 단면특성에 따라서 구분한 각 실험체의 실험변수는 표 1과 같다. 띠철근비는 Eurocode의 규정[10]에 준하였으며, 기준 실험체인 SPB-BA는 띠철근을 기둥의 소성힌지 구간에 1.06%의 띠철근비로서 50mm의 간격으로 배근하였다. 실험변수에 따라서 기둥내부에서 발생되는 변형률과 이에 따른 휨강성의 변화를 관찰하였다.

표 1. 실험변수

Specimen	Axial Loads (kN)	Structural Steel		Reinforcement			
				Transverse		Longitudinal	
		ratio(%)	size(mm)	ratio(%)	size	ratio(%)	size
SPB-BA	-	1.07	125×125	1.06	D10	0.56	D16
SPB-WA							
SPB-SR				0.53			
SPB-CT		1.21	ϕ_I=200	1.06			
SPBC-BA	667	1.07	125×125				
SPBC-SR				0.53			
SPBC-CT		1.21	ϕ_I=200	1.06			

SPBC-BA,WA,SR,CT
- BAse, Weak-Axis, Stirrup-Reduction, Circle-Tube
- Bending, Compression
- SPecimen

실험체에 매입된 축방향 철근은 모든 실험체에 대해서 D16철근 8가닥을 동일간격으로 배근하여 0.56%를 유지하였으며, 기둥의 형태는 그림 1과 같이 원형으로서 지름은 600mm이고 가력부에서 기초 상면까지의 거리는 2,100mm이다. 원형강관을 매입한 실험체는 강관내부에 내부에 기초상면 위로부터 600mm만큼 콘크리트로 부분 충진하였다. 실험체에 가해진 압축력은 $0.1f_{ck}A_g$에 해당하는 667kN이며, 횡하중은 실험체가 파괴에 도달할 때 까지 가력하였다. SRC합성기둥의 강재비에 대한 각국의 대표적인 규정은 Eurocode의 경우 강재의 비율(steel contribution ratio)은 $\delta=(A_af_y/\gamma_a)/N_{pl.Rd}$와 같이 정의하고 있으며, 그 값은 0.2에서 0.9로 제한하고 있으며[11]. 본 연구에 사용된 실험체의 강재비율 0.15이다. 여기서 A_a,f_y,γ_a는 강재에 대한 단면적, 항복강도 및 부분안전계수이며 $N_{pl.Rd}$는 합성단면의 압축에 대한 소성저항력(plastic resistance to compression)을

나타낸다. AISC-LRFD에서는 단면적의 4%이상으로 각각 규정하고 있고[12] ACI318-02에서는 주철근비에 관한 비율로서 2%에서 8%의 축방향 철근비를 규정하고 있다.[13] 본 연구에 사용된 실험체는 1.63%의 최소한의 강재비를 사용하여 제작되었다.

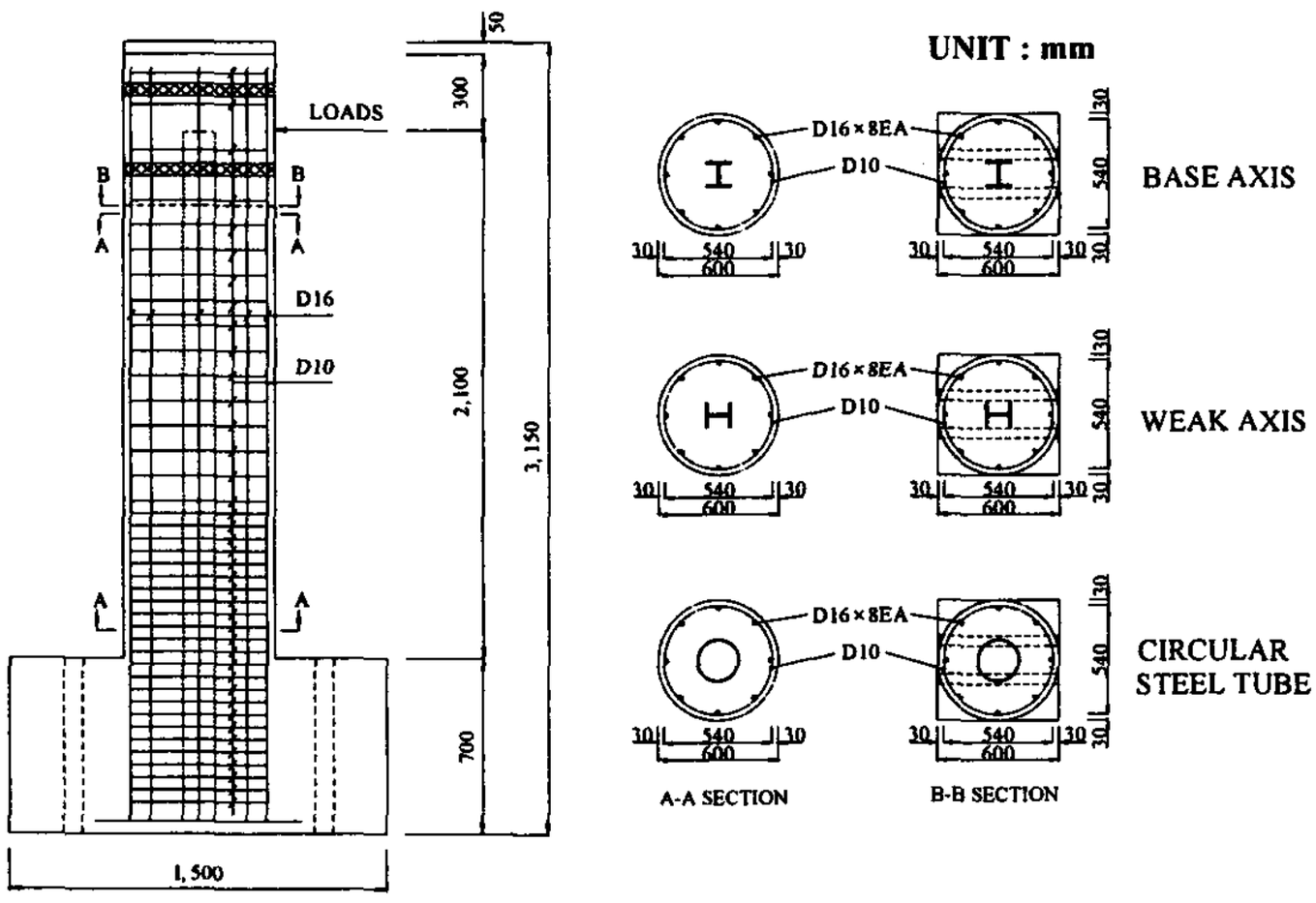

그림 1. 실험체 단면도

2.2 재료특성

실험체에 사용된 축방향 철근은 SD30의 D16이며, 횡방향 띠철근은 SD30의 D10 철근을 사용하였다. 기둥 내부에 매입된 강재의 종류는 강종 SS400의 H형 강재(125×125)와 원형 중공강관(내부지름 ϕ_I=200mm, 두께 t=5.3mm)이다. 콘크리트 재료는 25mm 굵은 골재를 사용한 레디믹스트 콘크리트를 사용하였으며 설계 압축강도는 24MPa이다. 철근의 인장강도는 KS B 0820에 따라서 각각 3개의 시험편에 대한 인장실험을 실시하였다. 주철근인 D16철근은 343MPa, D10의 횡방향 철근은 333MPa의 평균 항복강도 결과를 나타내었다.

2.3 하중재하 및 측정내용

순수 휨 실험의 경우에는 실험체에 횡방향 수평하중을 가할 수 있도록 가력벽에 1,000kN의 Actuator를 설치하여 하중을 가하였으며, 휨과 압축을 동시에 받는 경우에는 실험체 상부에 하중 1,000kN의 유압실린더를 사용하여 압축력을 도입하고 동시에 가력벽에 설치된 Actuator를 사용하여 횡방향으로 하중을 가하였다. 휨 모멘트 성능을 실험하기 위해서 재하된 횡방향 하중의 형태는 Actuator에 내장되어있는 로드셀을 사용하여 그림 2와 같이 하중제어와 변위제어 하중을 단계별로 적용하였다. 그림 3은 하중이 재하되는 실험체 전경과 실험체의 거동을 분석하기 위하여 실험체에 부착한 계측기기의 위치를 나타낸다. 변형률 게이지의 변화를 분석함으로서 강성이 급속하게 변하는 시점에 대한 정량적인 관찰을 가능하게하고 하중증가에 따른 국부거동을 측정하기 위해서 기둥의 소성힌지 구간 콘크리트 내부에 매입된 강재와 주철근에는 가력전면과 후면에 100mm 간격으로 변형률 게이지를 부착하였다.

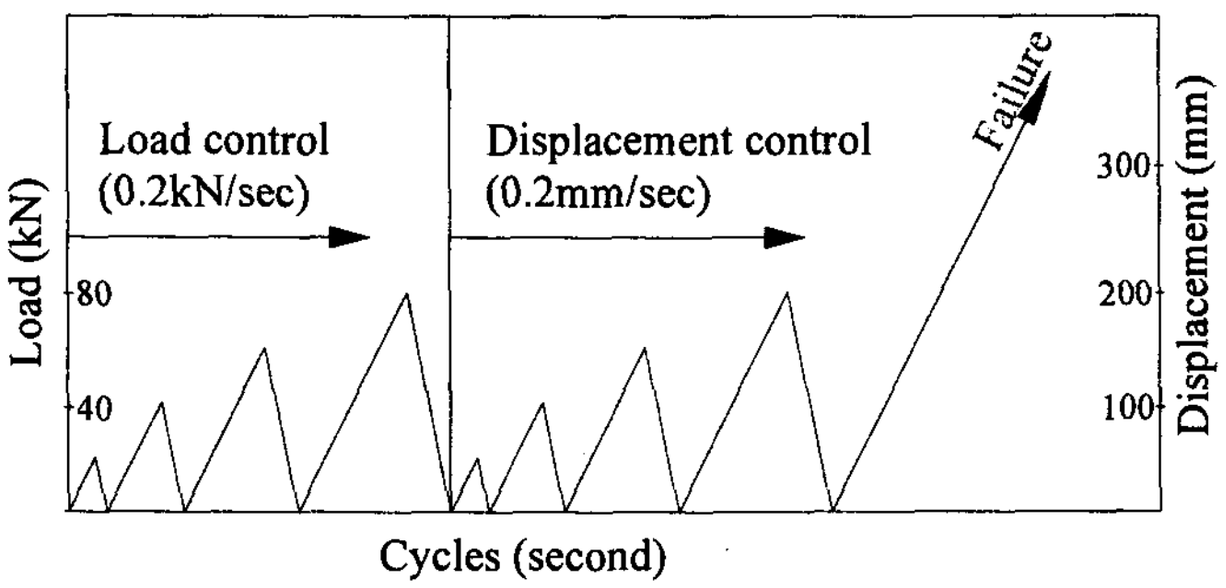

그림 2. 하중 재하 형태

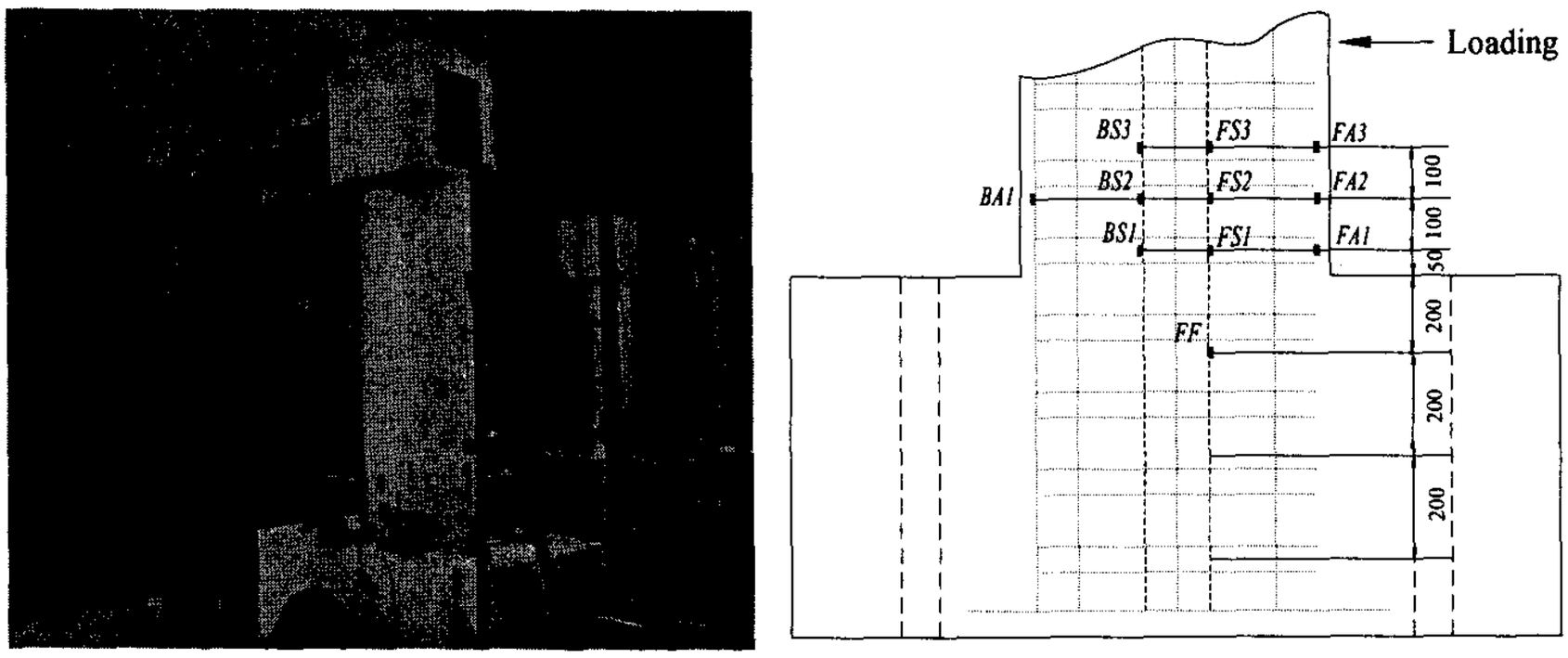

그림 3. 하중 재하전경 및 계측장비 설치도

3. 실험결과

3.1 최대휨강도

설계 압축강도의 10%인 667kN의 축방향하중과 횡하중을 동시에 재하한 SPBC-BA실험체는 1축 횡하중을 사용해서 가력한 SPB-BA실험체에 비해서 휨강도는 24.9% 증대되었으며, 전반적으로 순수휨 상태보다는 휨과 압축을 동시에 받는 상태에서 휨강도가 증가하는 것을 알 수 있다.

실험 변수에 따른 실험체의 최대 휨모멘트 강도를 비교하면, H형강을 강축으로 매입한 기준 실험체(SPB-BA, SPBC-BA)에 비하여 원형 강관을 매입한 실험체(SPB-CT, SPBC-CT)에서 각각 13.5%와 5.2%의 휨강도가 증가되었다[8]. 이는 재하방향에 대한 원형강관의 단면 2차모멘트가 H형강에 비하여 크게 발생하였을 뿐 아니라, 원형강관내부에 부분 충진한 콘크리트와 원형강관이 상호 구속작용을 함으로서 강도 증진 효과가 나타난 것으로 사료된다.

3.2 국부거동

기둥의 소성힌지 구간을 중심으로 기둥내의 국부요소의 하중 증가에 따라서 발생되는 변형률을 측정하였다. 그림 3에서 나타낸 위치에 강재와 철근을 중심으로 거동을 측정하였다. 그림 4는 H형강재와 원형강관의 거동을 복부에서 발생된 변형률을 통해서 나타내었다. 초기 탄성구간 거동에서는 소성힌지 하단에 있는 FS1에서 큰 변형률이 발생되었으며, 원형강관에서는 균열 발생이후에도 H형강재를 매입한 SPB-BA 실험체에 비해서 급속한 변형률 변화가 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

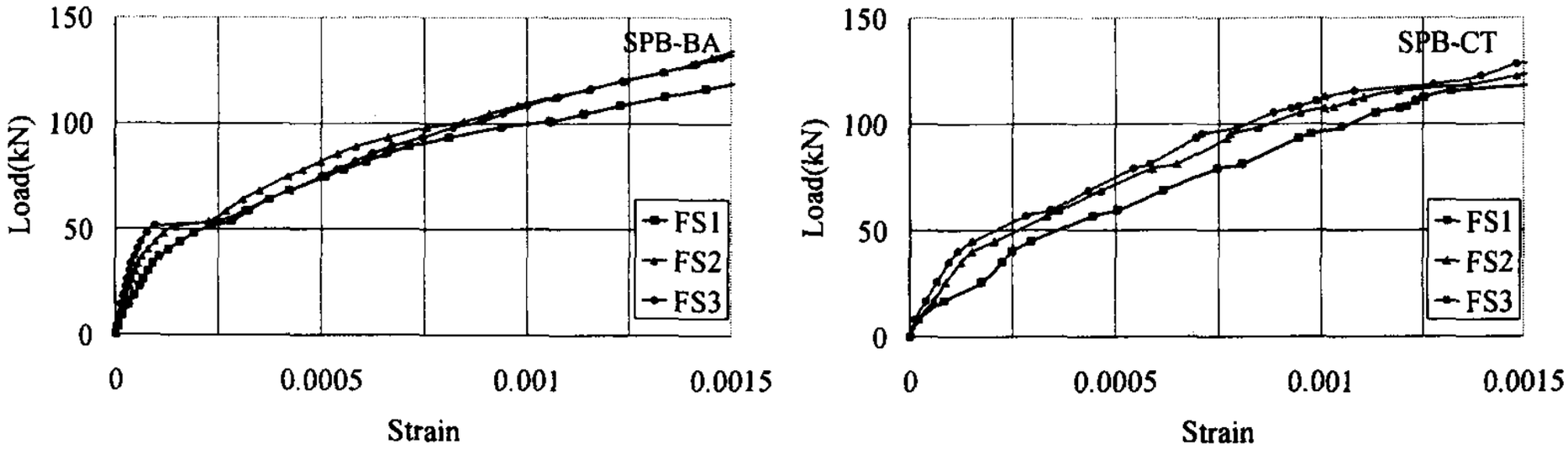

그림 4. 내부 매입 강재의 변형률 변화(SPB-BA & SPB-CT)

그림 5는 실험체의 가력 전면과 후면의 축방향 철근에 게이지를 부착하여 발생된 변형률 결과를 나타낸 그래프이며, 그림 6은 변형률 증가에 따라서 발생된 실험체의 균열발생 모습이다. 하중이 증가함에 따라서 점차적으로 축방향 철근의 변형률 분포는 소성힌지 구간내에서 높이에 따라 차이를 나타낸다. 실험변수와 하중 조합에 따른 철근의 변형률 변화는 서로 다른 값들을 나타내지만 공통적으로, 초기 하중 재하구간에서는 선형적인 변화를 나타내고 이후 균열이 발생되는 시점에서는 하중-변형률 그래프의 기울기가 변화하며 균열이 급속히 진전됨에 따라서 변형률이 급속히 증가한다. 이후 하중이 지속적으로 재하되어 실험체가 항복하기 전 단계에서 하중이 급속히 증가하며 항복하는 형태를 하중-변형률 그래프를 통해서 나타냈으며, 각 단계에서의 경향을 뚜렷하게 나타낼 수 있다.

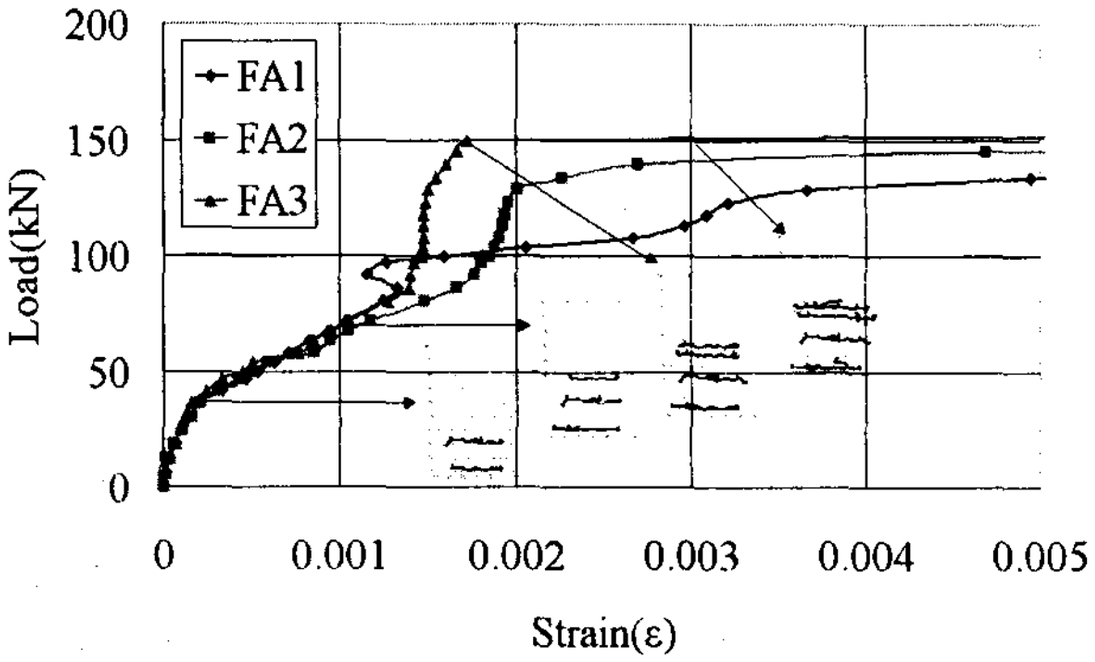

그림 5. 축방향 철근의 변형률(SPB-BA)

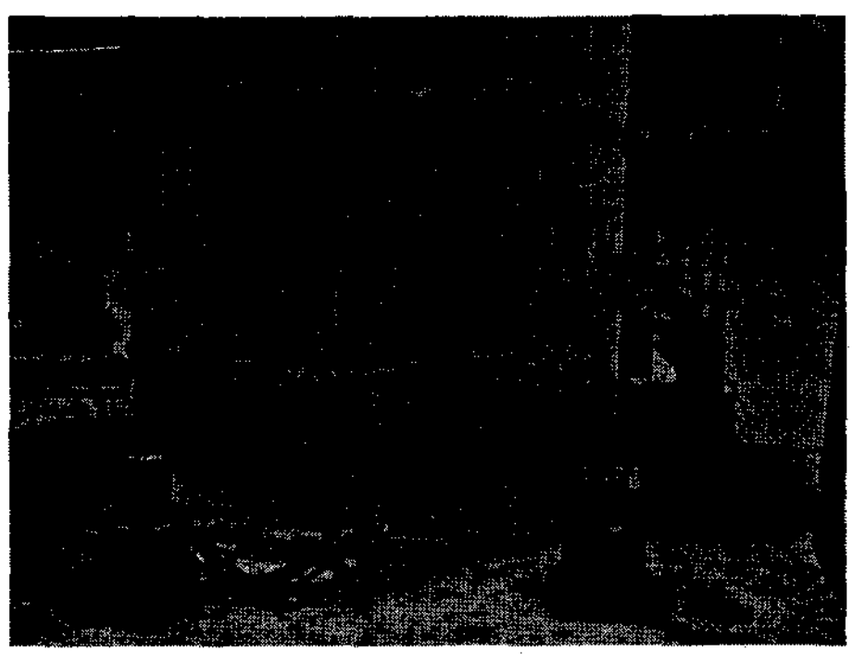

그림 6. 소성힌지 인장파괴 형태

4. SRC 기둥의 강성변화

하중의 증가에 따른 강성의 변화는 구조물의 성능과 밀접한 관계가 있으며, 교량의 내진 해석에 적절한 강성을 부여하는 것이 중요하다. 실험을 통해서 하중재하에 따른 기둥의 강성변화를 분석하였다. 기존의 RC콘크리트기둥에 대한 초기강성은 응력-변형률 그래프에서 곡선의 기울기가 선형적으로 증가하는 구간으로 정의하였으며, 유효강성에 대한 표현은 실험을 통해서 M.J.N. Priestley[14]등에 의하여 제시된 경험식 $EI_e = 0.5EI_g$로 평가한 근사식을 사용하였다. 또한, Eurocode2[10]에서는 그림 7과 같이 극한강도(f_{cm})의 $0.4f_{cm}$에 해당되는 강도의 응력-변형률 곡선에서의 기울기를 사용한다.

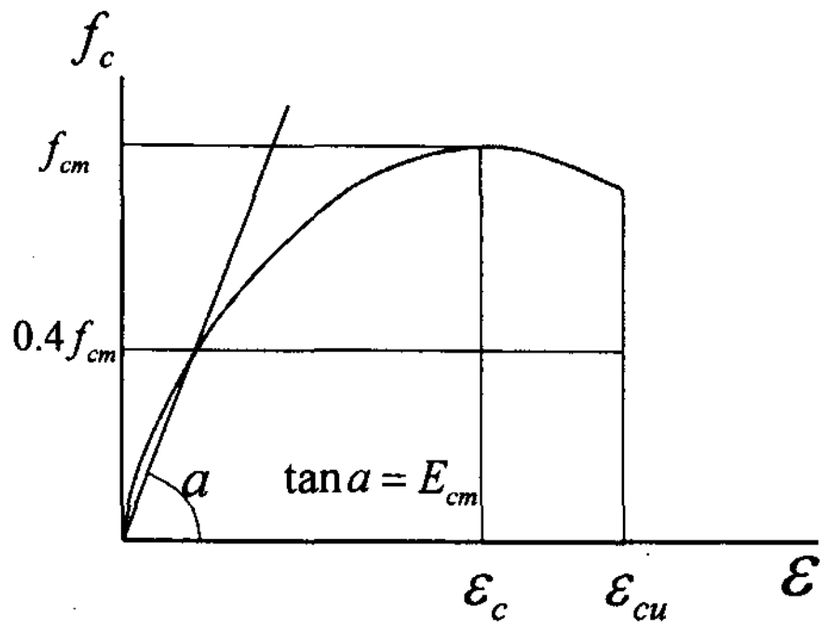

그림 7. 콘크리트의 비탄성 거동

여기서, ε_c는 콘크리트의 최대 압축변형률, ε_{cu}는 콘크리트의 공칭극한 압축 변형률, f_{cm}은 콘크리트의 최대압축강도이고 E_{cm}은 할선탄성계수를 나타낸다. 그러나, 하중재하에 따라서 발생되는 변형은 탄성구간과 비탄성구간을 명확히 구분하는 것이 불분명하므로 실험을 통해서 하중-변위의 관계를 균열발생과 더불어 강성을 평가하였으며, 초기강성과 유효강성으로 구분하였다. 더불어 단면2차모멘트의 변화에 의해서 발생된 강성의 변화를 해석한 결과와 실험에 의한 강성의 변화를 비교함으로서 SRC합성기둥에서의 적절한 유효강성의 단계를 평가하였다. 먼저, 계산에 의한 강성은 그림 8과 같이 전단면에 대한 강성으로 초기 강성을 표현 하였으며 유효강성은 하중이 증가하여 콘크리트 인장부에 균열이 발생되고 압축력과 인장력이 평형을 이루는 상태의 중립축을 중심으로 단면 2차 모멘트에 의해서 계산 되었다. 이때, 인장부 콘크리트의 단면 및 강성을 무시하였으며, 변화된 중립축을 중심으로 압축 콘크리트의 단면과 축방향 철근 및 강재에 대하여 단면 2차 모멘트를 계산하였다.

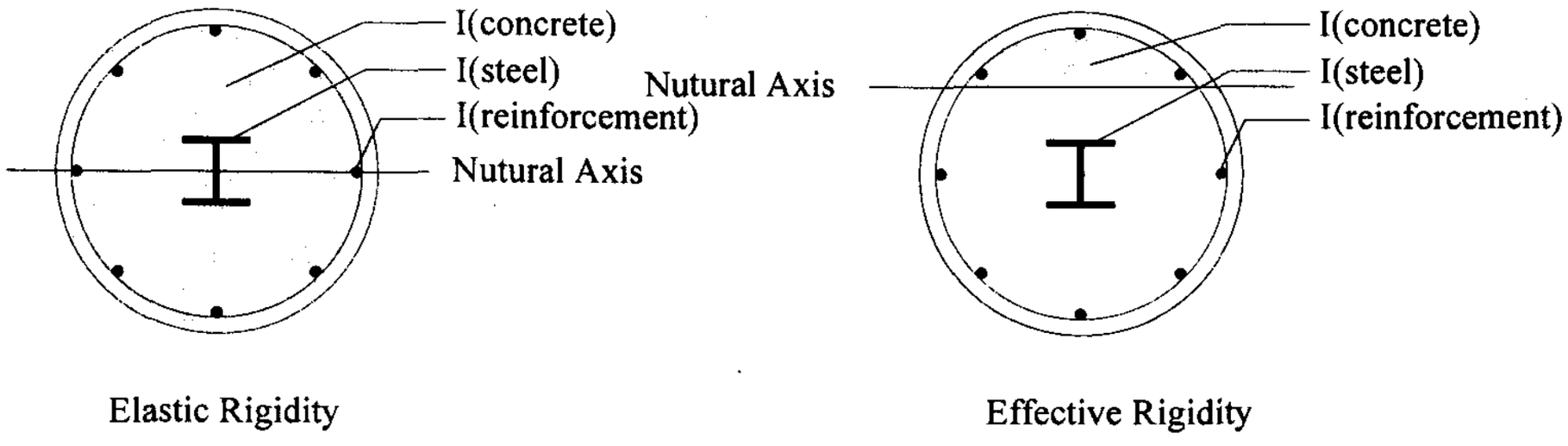

그림 8. 초기 강성과 유효강성에 대한 단면 정의

표 2. 계산에 의한 유효강성의 분석

I(콘크리트기준)

부재명	전단면 2차모멘트(I_1) (cm^4)	균열단면 2차모멘트(I_2) (cm^4)	강성감소율(%) $\left(\frac{I_1 - I_2}{I_1} \times 100\right)$
SPB-BA	679,837.2	155,635.0	77.1
SPB-WA	675,952.0	149,183.6	77.9
SPB-CT	686,523.1	169,909.6	75.3

표 2는 실험체의 유효강성에 대한 계산결과를 나타낸 것으로서 실험체에 축하중이 발생됨에 따라서 강성의 감소가 다소 지연되는 것을 볼 수 있다. 또한 실험 변수별 특징을 기준으로 계산에 의한 강성의 변화를 분석하면 탄성구간에서의 강성은 강재의 형태와 배치에 따라서 결정되며, 비탄성 구간에서는 중립축의 위치와 강재 및 철근의 배열에 따라서 강성의 변화가 발생한다는 것을 알 수 있다. 또한 1축하중 재하 실험체와 2축하중 재하 실험체는 모두 원형강관을 매입한 단면에서 강성의 저하를 다소 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었다. 다음의 표 3은 위의 각각의 실험체에 대해서 최초 휨강성을 100으로 기준하였을때 하중 하중증가에 따른 강성의 값을 나타내었다.

표 3. 실험에 의한 각 실험체의 강성변화율

Specimens	Stiffness(%)				
	Elastic(ref)	Initial Crack	0.6Pu	0.85Pu	Ultimate Load(Pu)
SPB-BA	100	81.14	53.02	36.56	9.53
SPB-WA	100	63.51	49.18	32.63	6.82
SPB-CT	100	86.78	47.37	23.57	3.81
SPBC-BA	100	81.11	59.64	38.35	17.67
SPBC-SR	100	75.31	55.65	32.94	18.74
SPBC-CT	100	73.90	54.51	34.09	4.28

그림 10과 그림 11은 실험에 의한 각 단계, 즉 초기 탄성구간과 균열이 시작되는 시점, 극한하중의 60%, 85% 및 극한하중에서 발생된 강성을 계산에 의한 휨강성의 감소율과 함께 나타낸 것이다. 그림 10은 1축하중에 의한 강성변화의 결과를 나타내었고 그림 11은 2축하중에 의한 강성의 변화를 나타내었다. 계산에 의한 휨강성과 실험에 의한 휨강성변화는 실제 항복하중의 85~90%내외에서 유사했으며 1축하중이 재하된 실험체는 2축하중 실험체에 비해서 최초 균열을 중심으로 강성감소가 보다 빠르게 저하되는 경향을 나타낸다. 또한 2축하중을 받는 SRC실험체는 초기 탄성구간의 강성에서 극한하중에 도달할 때까지 강성 저하가 1축에 비해서 비교적 일정하게 감소되는 경향을 보인다.

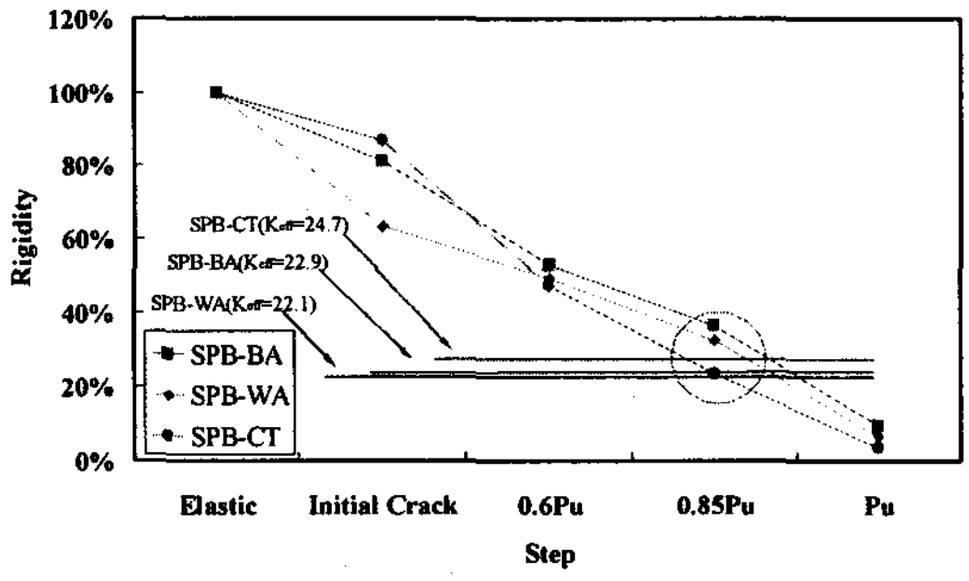

그림 10. 1축하중 SRC 실험교각의 강성변화

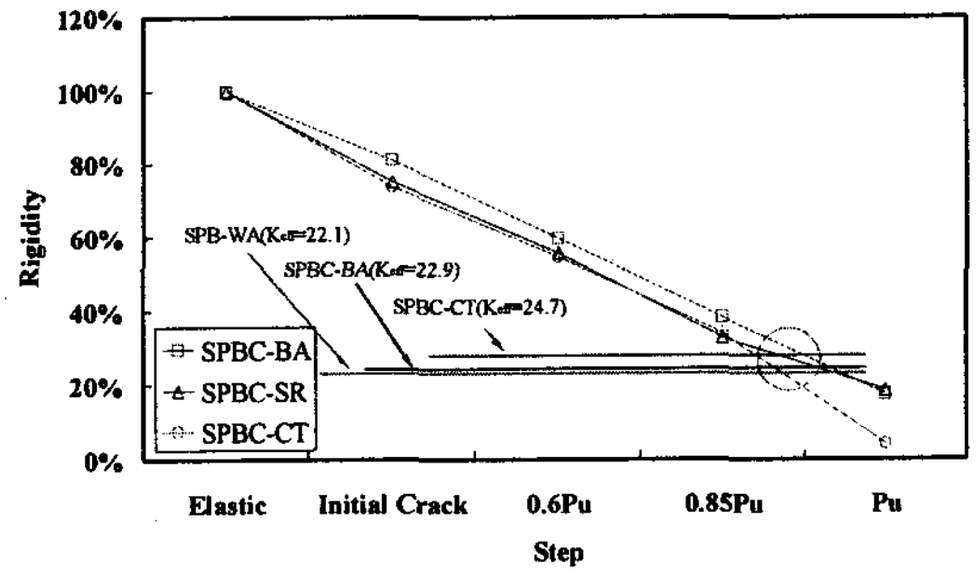

그림 11. 2축하중 SRC 실험교각의 강성변화

5. 결 론

강재비가 낮은 SRC 합성기둥에 대한 정적 실험을 수행하여 비탄성 거동을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 합성기둥의 강성은 하중의 증가에 따라서 선형적인 분포를 이루며 감소하고 1축하중을 받는 기둥에 비해 축력이 있는 2축하중 실험체의 강성감소가 작게 평가 되었다.
2) 균열 단면에 대한 강성이 최초 전단면 강성의 25% 수준으로 평가되는데 이는 실험에서 극한 하중의 85% 수준에서 나타난 강성의 변화와 일치하였다.
3) 추가적인 실험 수행을 통해 SRC 기둥의 유효강성 평가식을 제시할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김원기 ,이강훈 "합성기둥의 국내외규준 비교분석" 한국강구조학회지 Vol.5 No.1 (1993)
2. 정영수, 박창규, 이은희 "지진을 경험한 형상비 2.5 RC 교각의 내진 변위 연성도 평가" 한국 지진공학회 논문집 Vol.7 No.3 (2003)
3. 이승준, 김원기, 서동훈 "SRC 기둥-H 형강보 접합부의 전단강도 및 이력거동" 한국강구조학회 논문집 Vol.9 No.2 (1997)
4. 송준엽, 권영봉, 김성곤 "콘크리트충전 강합성교각의 구조적 거동에 관한 연구" 한국 대한토목학회 논문집 Vol.20 No.5-A 737-746 (2000)
5. 송준엽, 권영봉, 김성곤 "반복하중을 받는 콘크리트 충전 강합성 기둥의 연성에 관한 연구" 한국 지진공학회논문집 Vol.5 No.6 (2001)
6. Lu XL ,Yu Y ,Kiyoshi T ,Satoshi S "Nonlinear analysis on concrete-filled rectangular tubular composite columns" Structural Engineering & Mechanics 2000 Dec10(6) 577-587 Structural Engineering & Mechanics (2000)
7. C.C. Weng, S.I. Yen. "Comparisons of concrete-encased composite column strength provisions of ACI code and AISC specification" Engineering Structures 24 59-72 (2002)
8. 정인근, 민진, 심창수, 정영수 "SRC합성기둥의 P-M상관도 분석을 위한 실험" 대한토목학회 정기 학술대회 Vol.1A 225-228 (2004)
9. 정인근, 민진, 심창수, 정영수 "SRC기둥에 대한 정적실험" 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집 Vol.16 No.2 97-100 (2004)
10. Eurocode2 Design of concrete structures Part 1 General rules and rules for buildings
11. Eurocode4 Design of composite steel and concrete structures Part 1.1 General rules and rules for buildings
12. Load and Resistance Factor Design (LRFD) Specification for Structural Steel Buildings. American Institution of Steel Construction (AISC), (1999)
13.Building code requirements for structural concrete ACI 318-02 and commentary (ACI 318R-02) American Concrete Institute (ACI) (2002)
14. M.J.N. Priestley, F. Seible, G. M. Calvi "Seismic design and retrofit of bridges" John Willey & sons, Inc. 1996