

축력과 반복횡력을 받는 고강도 R/C기둥의 비선형 해석

Nonlinear Analysis of High-Strength R/C Columns Subjected to Reversed Cyclic Loads with Axial Compression

신성우 [*]	서선민 ^{**}	한범석 ^{***}
Shin, Sung Woo	Seo, Seon Min	Han, Beom Seok
안종문 ^{****}	반병열 ^{*****}	이광수 ^{*****}
Ahn, Jong Moon	Bahn, Byong Youl	Lee Kwang Soo

ABSTRACT

The objective of this paper is to analyse the high-strength concrete columns subjected to reversed cyclic and axial loads by using nonlinear analysis model and compare the experimental results with analysis. The analytical parameters are the compressive strength of concrete, spacing of lateral reinforcement and lateral reinforcement ratio.

In this study, the proposed analytical model takes into account the influence of confined concrete, tension stiffening and strain hardening of steel. The high-strength concrete columns are used to model fiber section element.

The analysis results are shown comparatively good prediction on envelope curve, accumulative dissipated energy, deformability and so on.

1. 서론

오늘날 건축물의 초고층화, 대형화, 특수화 됨에 따라 재료의 고강도화가 요구되고 있는 반면 국내에서는 이러한 고강도 콘크리트에 대한 연구와 실용화가 미흡한 실정이다. 특히, 건물의 고층화 됨에 따라 지진이나 바람과 같은 수평하중에 의하여 고층건물의 하부층 기둥에는 높은 전단력 및 고전도 모멘트가 발생하여 복합적인 하중을 받게 되며, 이로 인하여 기둥이 취성적 거동을 피하기 위하여 횡보강근의 간격, 횡보강근의 양 그리고 콘크리트 압축강도에 따른 고강도 콘크리트 기둥의 연성적인 거동을 확보하기 위한 실험을 실시하였다. 이러한 실험에 의한 구조물의 내진성능 향상 및 평가기술의 향상에 부응하여 컴퓨터를 사용한 이론적인 해석방법은 매우 중요한 의미를 지니게 된다.

- * 정회원, 한양대학교 건축공학과 교수
- ** 정회원, 한양대학교 대학원 건축공학과 석사과정
- *** 정회원, 한양대학교 대학원 건축공학과 박사과정
- **** 정회원, 한양대학교 대학원 건축공학과 박사수료
- ***** 정회원, 대전대학교 건축공학과 조교수
- ***** 정회원, 여주대학 건축공학과 부교수

그러므로 본 연구에서는 비선형 해석 프로그램인(nonlinear analysis program) DRAIN-2DX를 이용하여 축력과 반복횡력을 받는 고강도 철근 콘크리트 기둥의 이력거동을 예측하고 적정성을 평가하고자 한다.

2. 해석모델

일반적으로 구조해석 모델은 재료의 구성방정식을 사용하는 미시적 모델(microscopic model)과 전체적인 거동을 예측하기 위한 거시적 모델(macrosopic model)로 구분될 수 있다. 미시적 모델은 부분적인 응력과 변형의 상태를 파악하는 경우에 효과적이고, 거시적 모델은 간단한 이상화에 의해 전체적인 거동의 특성을 평가할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 구조체 전체적인 거동의 특성을 연구하기 위하여 DRAIN 2DX를 이용하였고, type 15은 fiber beam-column element로써 보와 기둥을 모델링 하는데 사용되는 비탄성 요소(inelastic element)이므로 type 15를 적용하였다.

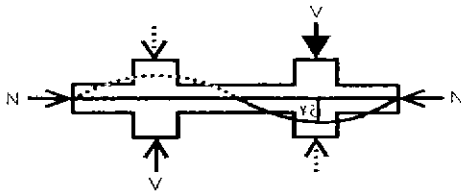


그림 1 실험체 상세

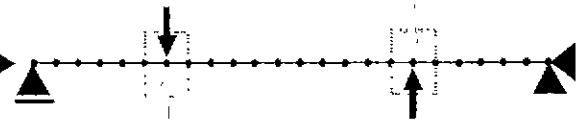


그림 2 해석모델링

2.1 R/C기둥 모델

Type15의 기본적인 요소모델 개념에 따라 본 연구에서 실험된 철근콘크리트 기둥의 해석 모델은 그림 2와 같으며, 그림 1에 나타난 것처럼 복곡률이 발생하는 실험체의 실험조건과 같게 하기 위하여 한쪽 단부는 roller로 하여 일정 축력이 작용할 수 있도록 하였고, 다른 한쪽 단부는 힌지(hinge)로 가정하였다. 반복하중은 실험과 동일하게 하기위하여 stub에서 서로 반대로 정(+), 부(-)의 횡력을 변위제어 방식으로 재하하였다.

기둥의 단면은 파이버 단면모델(fiber section model)을 적용하였으며, 스텐브(stub beam)는 탄성 단면모델(elastic section model)로 하여 무한강성으로 모델링 하였고, 소성힌지의 발생이 예상되는 위험구간(critical zone)에 대하여는 요소(element)수를 증가시켜 실험과 유사하게 소성힌지 확산범위 정도의 data를 얻을 수 있도록 모델링 하였다. 또한 기둥의 단면은 그림 3과 같이 구속 콘크리트와 비구속 콘크리트 부분, 그리고 철근의 재료적 특성을 고려하였다.

2.2 재료모델

2.2.1 콘크리트 모델

1999년에 Razvi & Saatcioglu는 횡보강근의 배근 형태, 항복강도, 간격, 체적비, 콘크리트 강도와 기하학적 단면 형태를 고려하여 그림3과 같은 콘크리트 구속모델을 제안하였다. Razvi & Saatcioglu에 의해 제안된 모델에서 구속된 콘크리트는 최대응력과 최대 변형률을 증가시키고, 이러한 구속된 콘크리트의 최대응력에서 변형률은 구속효과에 따라 영향을 받는 것으로 고려하였다. 최대응력 이후의 콘크리트 변형능력(deformability)은 주근의 거동에 의해 많은 영향을 받는 것으로 고려하였으며, 이것은 횡보강근량의 직접적인 영향으로 횡보강근이 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계에서 하강곡선 부분의 주요한 인자로 포함되었기 때문이다. 또한, 최대응력의 85%의 변형률에서 하강곡선의 기울기를 결정하였다.

따라서 본 해석에서는 Razvi & Saatcioglu에 의해 제안된 콘크리트 모델을 사용하였고, 식(1)은 구속된 콘크리트의 응력증가를 나타내는 식이다.

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_{1e}$$

$$f_{1e} = k_2 f_1, \quad f_1 = \sum_{i=1}^n \frac{(A_s f_s \sin \alpha)_i}{s b_c} \quad (1)$$

$$k_1 = 6.7(f_{1e})^{-0.17}, \quad k_2 = 0.15 \sqrt{\left(\frac{b_e}{s}\right) \left(\frac{b_c}{s_l}\right)} \leq 1.0$$

- f'_{co} : 구속되지 않은 콘크리트 강도
- f'_{cc} : 구속된 콘크리트 강도
- f_1 : 횡방향 압력
- f_{1e} : 등가 균일 압력
- b_c : 외곽 횡보강근 중심간 길이
- s : 횡보강근간 중심간 간격
- A_s, f_{yt} : 횡보강근의 면적과 항복강도
- α : 횡보강근과 b_c 사이의 각
- k_1 : 강도증진을 위한 구속압력과 관련된 계수
- k_2 : 구속철근의 효과를 나타내는 계수

2.2.2 철근 모델

철근 모델로는 그림 5와 같이 항복이후 최대강도까지 선형거동을 하는 변형률 경화(strain hardening)을 고려한 bi-linear 모델을 선택하였다.

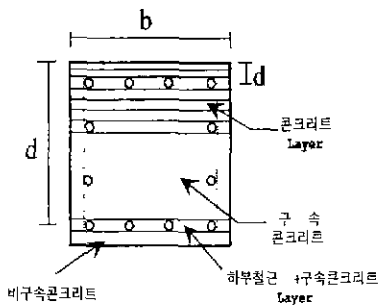


그림3. 기둥 단면의 모델

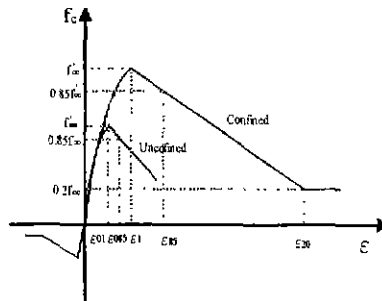


그림4. Razvi & Saatcioglu의 콘크리트 모델

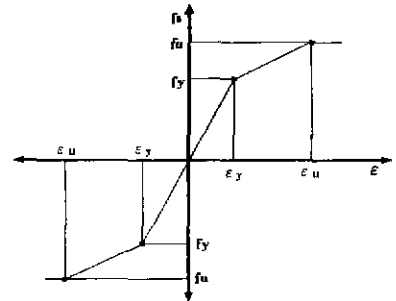


그림5. 철근모델

3 대상실험체의 개요

그림 1과 같이 각 실험체들은 일정축력으로 재하한 후 Stub beam에서 서로 반대로 경(+), 부(-)방향의 횡력을 변위조절 정해진 Cycle에 따라 가력하였다.

모든 실험체는 변위연성 증분비(Δ/Δ_y)에 따라 재하 하였으며, 같은 변위에서의 반복 하중재하는 매 단계(Cycle Group)에 각각 3회씩 7단계 총 21cycle로 계획하였다.

4 실험결과 와 해석결과와의 비교 분석

4.1 하중-변위 이력곡선

그림6은 해석에서 얻어진 하중-변위 이력곡선과 실험에서 얻어진 하중-변위 이력곡선은 콘크리트 압축 강도에 따라 나타내었다. 실험결과와는 거의 최대강도가 발생된 후에 부재의 강도저하가 현저하게 나타나는데 해석에서는 최대강도 발생한 후의 강도저하가 적게 나타났으나, 전체적인 거동의 양상은 대부분 실험과 유사한 형태를 나타내고 있다.

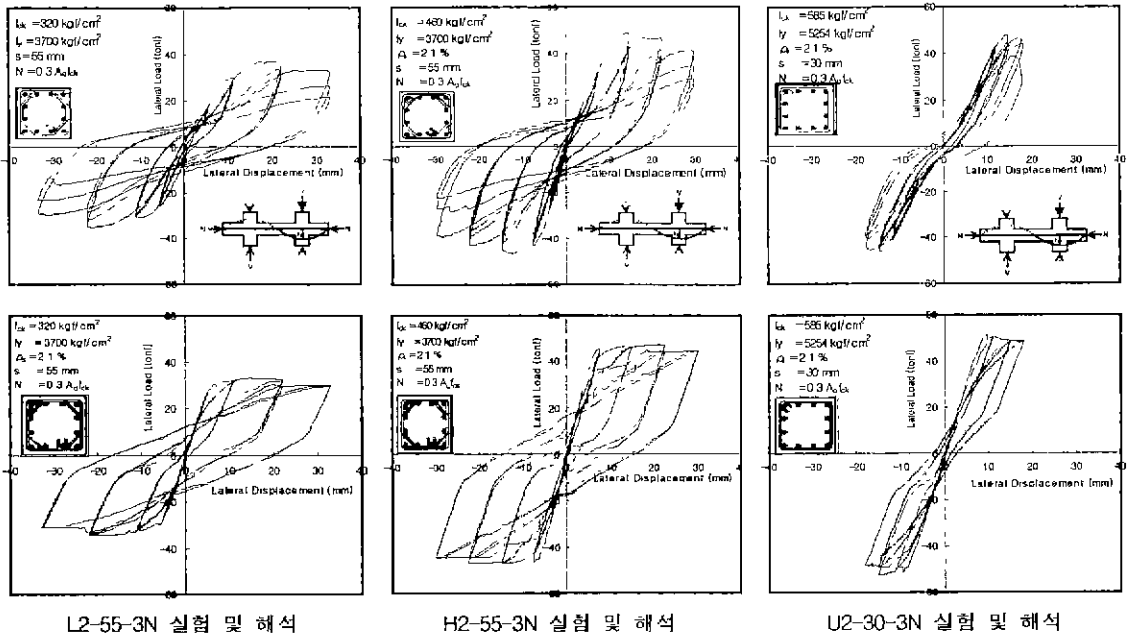


그림 6. 실험 및 해석의 하중-이력곡선비교

4.2 하중-처짐곡선

하중-처짐곡선은 그림7과 같으며, 실험과 거의 유사한 형태를 나타내고 있다. 콘크리트 압축강도의 변화에 따른 하중-처짐 곡선은 실험결과와 마찬가지로 콘크리트 강도가 증가함에 따라 최대 내력과 변위가 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 횡보강근 체적비의 증가에 따라 실험체의 최대내력 및 변위는 증가하는 것으로 나타났다. 보조 횡보강근의 유무에 따른 하중-처짐곡선 비교결과 보조 횡보강근이 배근된 경우는 배근되지 않은 경우에 비하여 최대내력은 비슷하게 나타나지만 최대변위는 크게 증가하는 것으로 나타나 실험을 통해 얻은 결과처럼 기둥의 연성거동을 확보하기 위해서는 보조횡보강근의 역할이 크게 작용하는 것으로 판단된다.

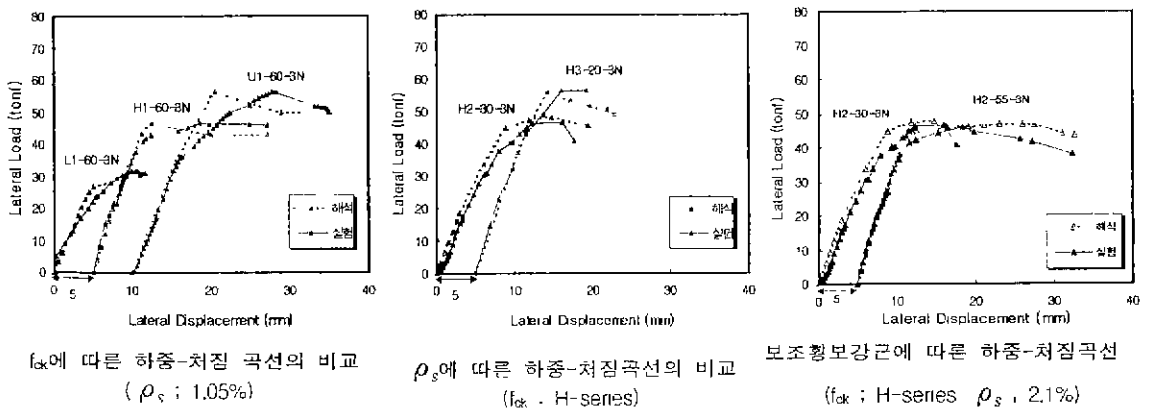


그림 7. 실험 및 해석의 하중-처짐곡선 비교

4.3 에너지 및 변위연성비

그림 8과 표1에서는 에너지 및 변위연성비를 나타내고 있다. 그림8에서의 누적에너지 소산능력은 해석이 실험보다 다소 크게 나타났으나, 에너지 지표는 해석결과와 실험결과가 거의 비슷한 것으로 나타났다. 이는 부재의 함복이후 해석에서 편칭과 강도저하의 영향이 실험보다는 다소 적게 나타났기 때문으로 판단된다. 또한 변위연성비는 해석결과와 실험결과가 거의 비슷한 것으로 나타났다.

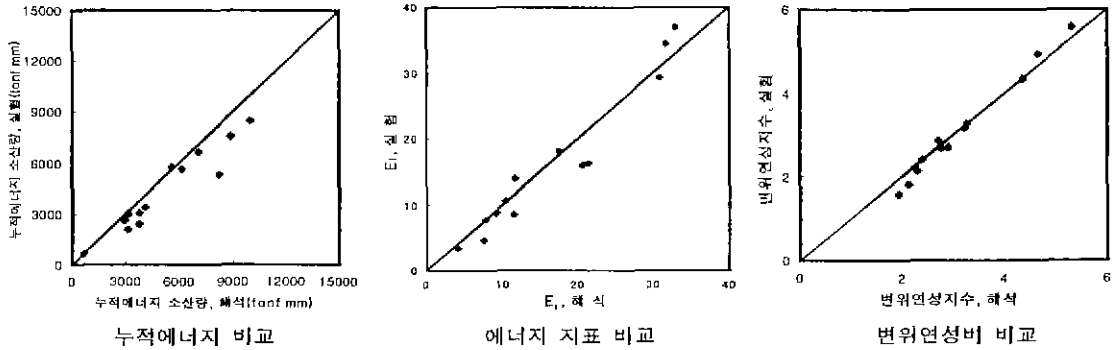


그림 8. 각 실험체별 에너지 및 연성지표

표1. 각 실험체별 에너지 및 연성지표

실험체명	횡보강근			f_{ck} (kgf/cm ²)	누적에너지량 (tonf·mm)		에너지지표 (E _i)		변위연성비	
	체적비 (%)	간격 (mm)	보조횡보 강근유무		해석	실험/해석	해석	실험/ 해석	해석	실험/ 해석
L1-60-3N	1.05	60	×	320	636.4	1.00	4.15	0.83	1.93	0.82
L2-30-3N	2.1	30	×	250	3770.7	0.63	21.5	0.75	2.9	0.93
L2-55-3N		55	○	320	6160	0.92	33.0	1.12	5.31	1.05
H1-60-3N	1.05	60	×	460	3120	0.96	10.4	1.02	3.27	1.0
H2-30-3N	2.1	30	×	517	2940	0.87	7.81	0.98	2.32	0.93
H2-55-3N		55	○	460	8870	0.85	30.9	0.95	4.35	1.0
H3-20-3N	3.15	20	×	517	3730	0.82	11.6	0.74	2.26	0.97
H3-37-3N		37	○	517	8240	0.64	20.8	0.77	2.7	1.06
U1-60-3N	1.05	60	×	615	5620	1.02	11.8	1.19	2.78	0.97
U2-30-3N	2.1	30	×	585	3090	0.66	7.57	0.63	2.14	0.86
U2-55-3N		55	○	615	9980	0.85	31.8	1.08	4.64	1.06
U3-20-3N	3.15	20	×	585	4050	0.83	9.23	0.95	2.41	0.99
U3-37-3N		37	○	585	7094	0.92	17.6	1.03	3.22	0.98

4 결론

이상과 같이 축력과 반복횡력을 받는 고강도 R/C기둥의 비선형해석에 대한 결과는 다음과 같다.

- 1) Razvi & Saatcioglu에 의해 제안된 콘크리트 구속 모델이 고강도 콘크리트가 사용된 R/C기둥을 비선형 해석하는데 최대강도, 초기강성등 전체적인 부재의 거동은 실험과 해석이 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

- 2) 하중-변위 이력 곡선과 하중-처짐곡선은 전반적으로 실험과 유사한 형태를 나타내었으나, 부재의 최대강도 이후 실험의 강도저하에 비해 해석의 강도저하는 적게 평가되었다.
- 3) 누적 에너지 소산량은 해석이 실험보다 다소 크게 평가되었으며, 이는 부재의 항복이후 편칭(pinching)과 강도저하가 실험보다 적게 평가되었기 때문으로 판단된다.
- 4) 변위연성비, 에너지지표는 실험/해석의비가 거의 1에 근접하므로 해석과 실험이 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.
- 5) 실험과 비슷한 결과로 보조 횡보강근이 있는 경우가 없는 경우 보다 누적 에너지 소산량이 2-3배 정도 차이를 나타냈다. 이는 기존의 Razvi & Saatcioglu에 의해 제안된 콘크리트 구속 모델이 횡보강근에 대한 효과를 비교적 잘 예측하고 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구를 진행함에 있어 세심한 지원을 아끼지 않으신 한양대학교 초대형구조시스템 연구센터에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) V. PRAKASH, G. H. POWELL AND S. CAMPBELL "DRAIN-2DX: BASE PROGRAM DESCRIPTION AND USER GUIDE" REPORT NO. UCB/SEMM-93/17, NOVEMBER 1993.
- 2) G. H. POWELL "DRAIN-2DX: ELEMENT DESCRIPTION AND USER GUIDE FOR ELEMENT TYPE01, TYPE02, TYPE04, TYPE06, TYPE09, and TYPE15" REPORT NO. UCB/SEMM-93/18, DECEMBER 1993
- 3) Murat Saatcioglu and Salim R. Razvi, "Strength and Ductility of Confined Concrete", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, No. 6, June, 1992
- 4) Salim Razvi and Murat Saatcioglu, "Confinement Model for High-Strength Concrete", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 125, No. 3, March, 1999
- 5) 신성우, 안종문외, "축력과 반복횡력을 받는 고강도 철근콘크리트 기둥의 연성평가" 대한건축학회 논문집. 제 15권 4호, 1999.10. pp.3~10
- 6) 신성우, 안종문, "고축력과 반복횡력을 받는 고강도 R/C기둥의 횡보강근 효과," 한국콘크리트학회 논문집. 제 11권 5호, 1999. 10. pp.3~10
- 7) 유영찬, "고강도 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 소성현저 이동 및 확산," 한양대학교 박사학위 논문, 1995년 12월