



삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥의 성능평가

김태훈^{1)*} · 이승훈¹⁾ · 이재훈²⁾ · 신현목³⁾

¹⁾삼성물산(주) 건설부문 기술개발팀 ²⁾영남대학교 건설시스템공학과 ³⁾성균관대학교 건축토목공학부

Performance Assessment of Solid Reinforced Concrete Columns with Triangular Reinforcement Details

Tae-Hoon Kim,^{1)*} Seung-Hoon Lee,¹⁾ Jae-Hoon Lee,²⁾ and Hyun Mock Shin³⁾

¹⁾Technology Development Team, Samsung Construction & Trading Corporation, Seoul 06241, Rep. of Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 38453, Rep. of Korea

³⁾School Civil and Architectural Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Rep. of Korea

ABSTRACT The purpose of this study was to investigate the performance of solid reinforced concrete columns with triangular reinforcement details. The proposed reinforcement details has economic feasibility and rationality and makes construction periods shorter. A model of solid reinforced concrete columns with triangular reinforcement details was tested under a constant axial load and a quasi-static, cyclically reversed horizontal load. A computer program, RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology), for the analysis of reinforced concrete structures was used. The used numerical method gives a realistic prediction of performance throughout the loading cycles for several test specimens investigated. As a result, proposed triangular reinforcement details for material quantity reduction was superior to existing reinforcement details in terms of required performance.

Keywords : triangular, reinforcement details, solid, columns, performance, economic feasibility, quasi-static

1. 서 론

중실 철근콘크리트 기둥은 내부에 콘크리트가 완전히 채워지는 철근콘크리트 기둥으로, 내부에 빈 공간이 형성되는 중공 철근콘크리트 기둥과 구별되며 경제적 및 구조적인 측면에서 토목, 건축 구조물 등에 널리 적용되고 있다.

중실 기둥은 보강 띠철근, 띠철근 등의 심부구속철근을 횡방향으로 배근하면 지진발생 시 작용모멘트가 기둥 단면의 최대저항 모멘트에 도달한 후 소성힌지가 발생하여 소성거동을 보인다. 이러한 소성거동을 보이도록 설계하는 것을 소성설계라고 하는데 일반적으로 탄성설계에 비하여 경제적인 설계결과를 얻을 수 있으며 도로교 설계기준¹⁾ 내지 콘크리트구조기준²⁾에 이러한 횡방향철근 상세에 대한 기준이 정립되어 사용되고 있다.

대표적인 중실 사각형 철근콘크리트 기둥은 보강 띠철

근 때문에 시공성이 떨어지는 단점이 있다. 기둥 단면을 가로지르면서 보강 띠철근을 배근해야 하는데, 이 배근 작업은 상당히 번거로울 뿐만 아니라 긴 작업시간이 필요하고 골재와의 간섭 등으로 콘크리트 타설을 어렵게 하기도 한다. 또한 경우에 따라 주철근의 전도 방지를 위해 사용하는 크레인의 효율을 떨어뜨리기도 한다(Fig. 1(a)).

이 연구에서는 중실 철근콘크리트 기둥의 철근상세의 개선방안을 도출하기 위해서 기존 연구^{3,4)}에서 개발된 삼각망 보강 횡철근을 수정하여 적용, 단면을 가로지르는 보강 띠철근의 생략을 실현한 철근 배근상세와 시공방법을 새롭게 개발하였다.

Fig. 1(b)와 같이 축방향으로 배근되는 외측 축방향철근과 2분 또는 3분의 외측 축방향철근 사이에 위치하도록 배근되는 내측 축방향 철근, 외측 축방향철근 바깥을 둘러 감으면서 배근되는 외측 횡철근과 외측 축방향철근과 내측 축방향철근을 삼각망으로 연결하는 보강 횡철근을 주요 특징으로 하는 물량저감 철근상세를 개발하였다. 이때 내측 축방향 철근은 기둥 축방향 철근으로 설계되는 것은 물론, 단지 외측 축방향철근과 삼각 구도를 형성시키기 위한 조립철근으로 강성에 포함되지 않게 단순 조립철근으로 설계하는 것도 가능하다.

*Corresponding author E-mail : th1970.kim@samsung.com

Received September 2, 2015, Revised November 7, 2015,

Accepted November 9, 2015

©2016 by Korea Concrete Institute

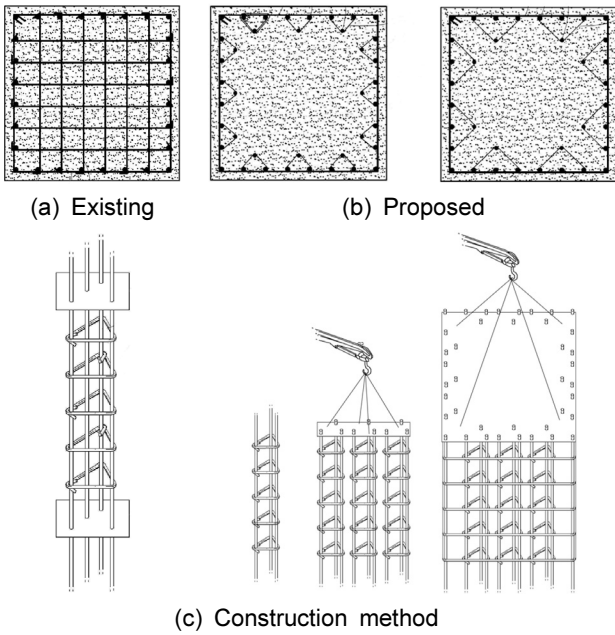


Fig. 1 Solid reinforced concrete columns with triangular reinforcement details

개발된 삼각망 철근상세는 전반적으로 철근 배근의 작업성을 향상시키고 공기를 단축할 수 있다. 또한 철근 배근에서 삼각 철근망 등 자립이 가능한 구조로 모듈화가 가능하기 때문에 철근의 전도 우려 없이 현장작업을 안정적으로 간소하게 진행할 수 있으며, 크레인 전용 지그를 이용한다면 하나의 기동을 위한 다수개의 삼각 철근망을 동시에 인양하면서 간편하게 철근 배근 작업을 실시할 수 있다(Fig. 1(c)).

이러한 삼각망 철근상세는 축방향철근, 횡철근, 보강 횡철근을 매개변수로 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)를 이용한 해석 등을 통해 가장 적절한 형태로 개발되었다. 개발된 중실 철근콘크리트 기둥의 철근상세는 배근작업이 손쉽고 급속시공이 가능하며 경제성과 합리성이 고려된 새로운 철근 배근상세이다.

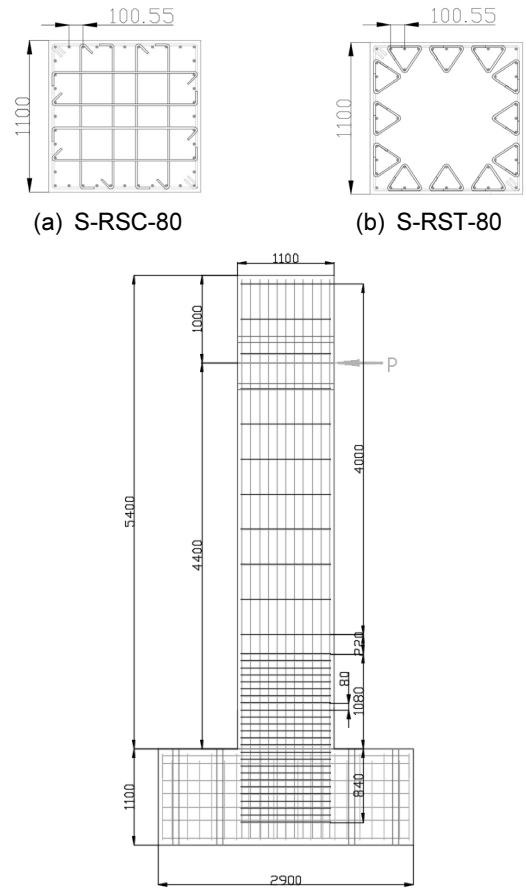


Fig. 2 Solid column specimen (Unit: mm)

2. 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥의 성능 실험

2.1 실험내용

개발된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥의 성능을 평가하기 위하여 국내외 중실 사각단면의 기둥 사례를 비교·분석하여 도출된 대표단면을 근거로 Fig. 2의 예와 같이 설계하였다.

Table 1 Properties of test specimens

Specimen		S-RSC-80	S-RST-80	S-RSC-120	S-RST-120	S-RSC-240	S-RST-240
Cylinder concrete strength (MPa)		28.1		24.3		27.4	
Longi. reinf. (D19, D16)	f_{yt} (MPa)	408.3	408.3, 448.4	408.3	408.3, 448.4	408.3	408.3, 448.4
	ρ_t (%)	0.95	1.14	0.95	1.14	0.95	1.14
Trans. reinf. (D13)	f_{yt} (MPa)	405.7		405.7		405.7	
	Space (mm)	80		120		240	
	Ratio (Compared to current code)	0.091 (94%)		0.060 (63%)		0.030 (31%)	
Quantity	Reinf. volume ratio	1.00	1.02	0.90	0.91	0.79	0.80
Axial force	$\frac{P}{f_{ck}A_g}$	0.07					

(Note) Design: Concrete - 24 MPa, Reinforcement - 300 MPa

삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥 실험체의 설계는 도로교설계기준(한계상태설계법),¹⁾ 콘크리트 구조기준,²⁾ 그리고 AASHTO LRFD³⁾를 근거로 하였으며 부재의 제작과정을 통해서 시공오차의 원인이 될 수 있는 항목을 면밀히 검토하여 반영하였다.

기둥 실험체는 비교·검증을 위하여 기존 철근상세를 갖는 실험체[S-RSC-80, S-RSC-120, S-RSC-240]와 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 실험체[S-RST-80, S-RST-120, S-RST-240]로 구성되며 제원은 Table 1에 나타내었다. 이때 모델의 단면은 1100 mm × 1100 mm인 중실 사각형이고 기둥의 하중 재하점까지의 높이는 4,400 mm로서 휨과괴 거동을 유도하기 위하여 형상비를 4.0로 결정하였다.

Fig. 3는 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 사각기둥 실험체의 제작과정을 나타내고 있다. Fig. 3(a)는 기초부 철근 조립이 완성된 모습이다. Fig. 3(b), 3(c)는 기둥부 철근상세의 예를 나타내는 모습이다. Fig. 3(d)는 축방향 철근, 횡철근, 그리고 보강 횡철근의 거동특성 분석을

위하여 계측용 게이지를 부착한 모습이다. Fig. 3(e), 3(f)는 기초부 거푸집과 기둥부 거푸집의 모습이다. Fig. 3(g)는 강제거푸집을 이용하여 콘크리트를 타설하는 모습이다. 그리고 Fig. 3(h)는 최종적으로 완성된 사각형 단면 중실 기둥 실험체의 전경이다.

기둥 실험체의 거동특성을 살펴보기 위하여 준정적(Quasi-Static) 실험을 수행하였으며 수평력은 Fig. 4와 같이 최대 변위 ±600 mm인 3,500 kN 유압가력기(actuator)를 이용하여 재하하였다. 축력은 현재 일정하중 유지장치로 재하

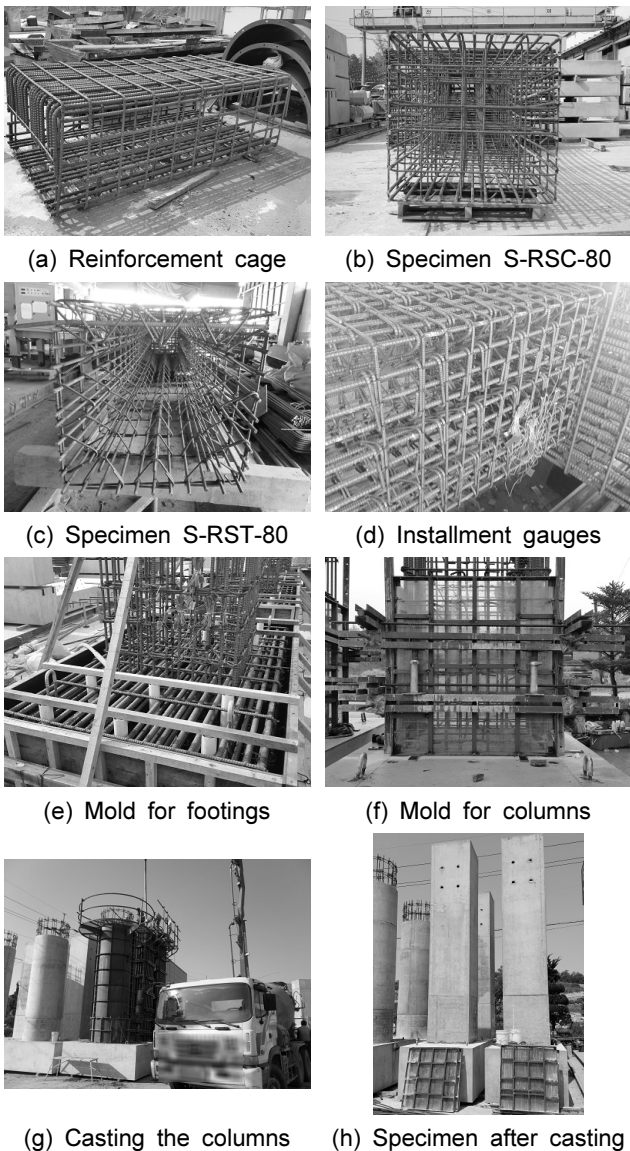


Fig. 3 Construction sequence for column specimens

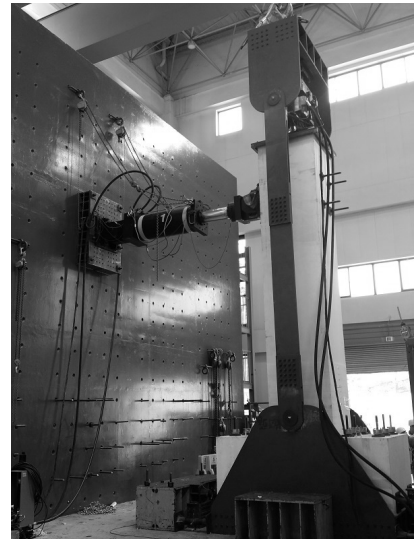


Fig. 4 Loading Setup

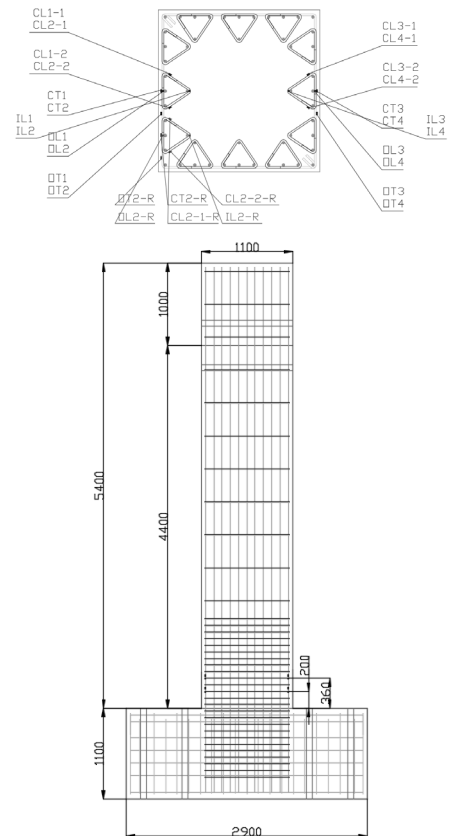


Fig. 5 Instrumentation of the test specimen

가 가능한 최대인 기둥단면 축강도의 7.0%를 변화가 없도록 재하하였고 변위진폭은 drift ratio $\pm 0.25\%$, $\pm 0.5\%$, $\pm 1.0\%$, $\pm 1.5\%$, $\pm 2.0\%$, $\pm 2.5\%$, $\pm 3.0\%$, $\pm 3.5\%$, $\pm 4.0\%$, $\pm 4.5\%$, $\pm 5.0\%$, $\pm 5.5\%$ 로 증가시켰다.

기둥 실험체에서 소성힌지 구역내의 축방향 및 횡방향 철근과 보강 철근에 Fig. 5와 같이 변형률 게이지를 부착하였다. 그리고 하중 재하점의 수평변위와 수평하중은 가력기에 설치된 변위계와 로드셀에 의해 측정하였으며, 가력부 및 기둥 중앙부의 하중 재하시 예상치 못한 기초부위의 수평변위나 들림을 변위계를 이용하여 측정하였다.

2.2 실험결과 및 분석

중실 기둥 실험체에 대한 하중-변위 이력곡선을 Fig. 6~8에 나타내었으며 공칭모멘트에 대한 설계하중과 최종 재하 단계에서의 파괴 양상을 함께 표시하였고 각 실험체별 최대하중과 변위연성도를 정리하여 Table 2에 나타내었다. 하중-변위 이력곡선은 횡방향 하중 및 가력지점의 변위에 의해 표시되는데 실험체의 강도, 연성, 그리고 에너지 소산능력을 평가하는 중요한 분석 자료이다.^{6,7)} 이때 변위연성도는 철근콘크리트 기둥의 변위연성도 평가에서 가장 널리 사용되고 있는 Park⁸⁾의 간접적인 방법으로 구하였다.

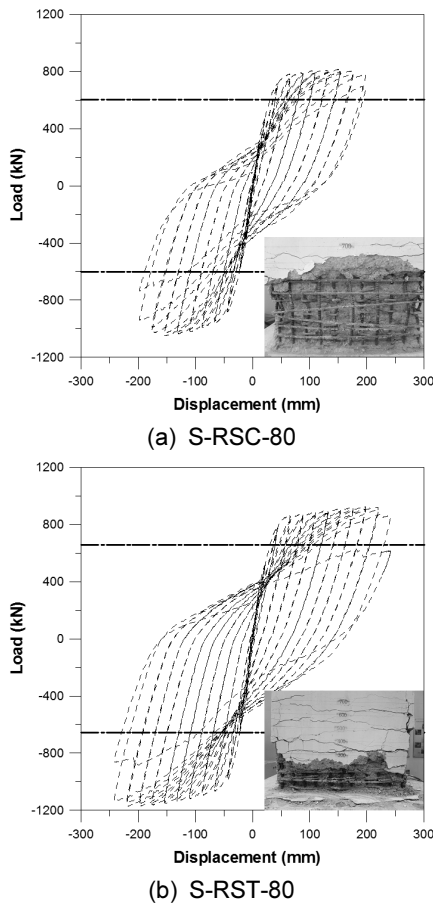


Fig. 6 Lateral load-displacement relationship for specimen 80

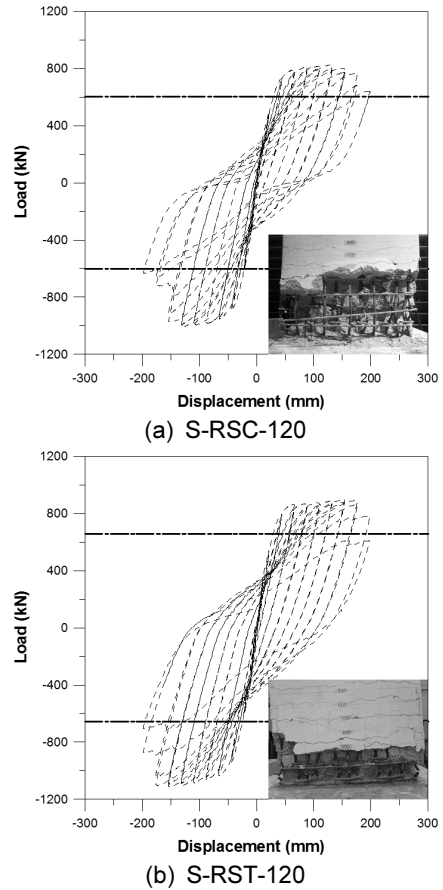


Fig. 7 Lateral load-displacement relationship for specimen 120

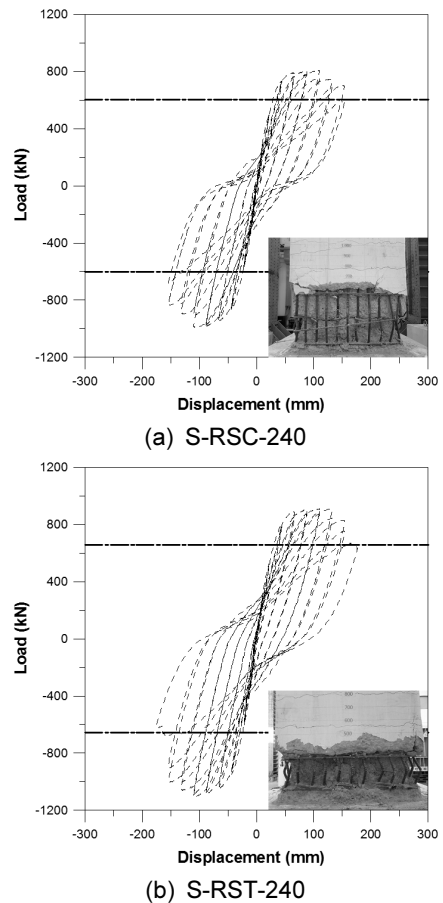


Fig. 8 Lateral load-displacement relationship for specimen 240

기존 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RSC-80)의 공칭모멘트에 대한 설계하중은 602.7 kN이며 실험값은 -1050.3 kN, 816.6 kN이다. 삼각망 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RST-80)의 공칭모멘트에 대한 설계하중은 656.9 kN이며 실험값은 -1172.8 kN, 923.1 kN이다.

단부구역에 내측 횡철근을 약 40% 감축하여 배근한 중실 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RSC-120)의 공칭모멘트에 대한 설계하중은 602.7 kN이며 실험값은 -1008.0 kN, 826.1 kN이다. 삼각망 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RST-120)의 공칭모멘트에 대한 설계하중은 656.9 kN이며 실험값은 -1114.5 kN, 897.7 kN이다. 그리고 단부구역에 내측 횡철근을 약 70% 감축하여 배근한 중실 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RSC-240)의 공칭모멘트에 대한 설계하중은 602.7 kN이며 실험값은 -993.6 kN, 807.2 kN이다. 삼각망 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RST-240)의 공칭모멘트에 대한 설계하중은 656.9 kN이며 실험값은 -1105.6 kN, 910.8 kN이다.

기존 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RSC-80)의 경우 설계하중의 135% 수준까지 내력이 나타나고 있으며 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RST-80)의 경우 설계하중의 140% 수준으로 충분한 내력이 발휘되고 있다.

단부구역에 내측 횡철근을 약 40% 감축하여 배근한 기존 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RSC-120)의 경우 설계하중의 135% 수준까지 내력이 나타나고 있으며 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RST-120)의 경우 설계하중의 135% 수준으로 충분한 내력이 발휘되고 있다. 그리고 단부구역에 내측 횡철근을 약 70% 감축하여 배근한 기존 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기

둥 실험체(S-RSC-240)의 경우 설계하중의 130% 수준까지 내력이 나타나고 있으며 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RST-240)의 경우 설계하중의 135% 수준으로 충분한 내력이 발휘되고 있다.

기존 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RSC-80)의 변위연성도는 4.8, 4.3이고 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RST-80)의 변위연성도는 5.4, 5.3이다.

단부구역에 내측 횡철근을 약 40% 감축하여 배근한 기존 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RSC-120)의 변위연성도는 4.3, 3.8이고 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RST-120)의 변위연성도는 4.9, 3.7이다. 그리고 단부구역에 내측 횡철근을 약 70% 감축하여 배근한 기존 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RSC-240)의 변위연성도는 3.4, 3.0이고 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RST-240)의 변위연성도는 3.6, 3.4이다.

실험변수인 외측 구속철근의 간격, 그리고 보강띠철근의 형태와 개수 및 간격에 따라 요구연성도의 특성이 잘 나타나고 있으며 특히, 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체의 경우는 횡방향 철근량의 약 60% 만 배근하였음에도 단주의 요구연성도 5를 대략 만족하고 있음이 확인되었다.

Fig. 9에 각 실험체에 대한 누적 소산에너지를 나타내었다. 소산에너지는 하중-변위 이력곡선의 내부면적으로 정의되며 누적 소산에너지는 내부면적의 합으로 산정된다. 기둥의 손상을 평가하기 위해 부재가 파괴될 때까지 흡수 또는 소산할 수 있는 능력은 내진성능을 평가하는데 중요한 요소 중 하나이다.

기존 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RSC-80)의 누적 소산에너지는 1,800,000 kN·mm이다. 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RST-80)의 누적 소산에너지는 3,500,000 kN·mm이다.

Table 2 Experimental results

Specimen		V_{max} (kN)	δ_y (mm)	δ_u (mm)	μ
S-RSC-80	(+)	816.6	41.5	197.8	4.8
	(-)	1050.3	45.9	198.2	4.3
S-RST-80	(+)	923.1	44.6	241.7	5.4
	(-)	1172.8	45.7	242.2	5.3
S-RSC-120	(+)	826.1	40.6	176.3	4.3
	(-)	1008.0	40.7	153.9	3.8
S-RST-120	(+)	897.7	40.2	197.7	4.9
	(-)	1114.5	47.5	176.3	3.7
S-RSC-240	(+)	807.2	38.4	131.8	3.4
	(-)	993.6	43.6	132.6	3.0
S-RST-240	(+)	910.8	42.7	154.2	3.6
	(-)	1105.6	45.6	153.9	3.4

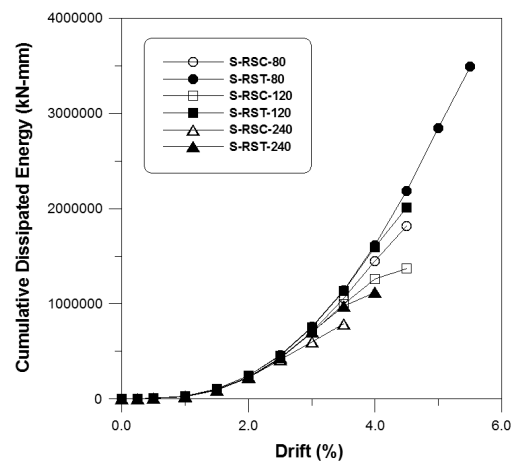


Fig. 9 Hysteretic energy dissipation

단부구역에 내측 횡철근을 약 40% 감축하여 배근한 기존 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RSC-120)의 누적 소산에너지는 1,400,000 kN·mm이다. 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RST-120)의 누적 소산에너지는 2,000,000 kN·mm이다. 그리고 단부구역에 내측 횡철근을 약 70% 감축하여 배근한 기존 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RSC-240)의 누적 소산에너지는 800,000 kN·mm이다. 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RST-240)의 누적 소산에너지는 1,100,000 kN·mm이다.

이를 통해 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 기둥이 기존 철근상세를 갖는 기둥에 비해 동등이상의 우수한 성능을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

중실 사각형 기둥 실험체의 국부적 거동특성을 분석하기 위하여 전술한 바와 같이 소성힌지구간에서 축방향 철근과 심부구속 철근에 변형률 게이지를 부착하였다. 수평하중이 작용할 경우 횡방향철근은 하중의 변화에 따라서 변형률의 증가 또는 감소가 발생하고 있으며 실험체 모두 항복변형률(2,000 microstrains) 이내에서 실험변수와 전반적으로 유사한 거동특성을 보이고 있음을 Fig. 10~12에서 확인할 수 있다.

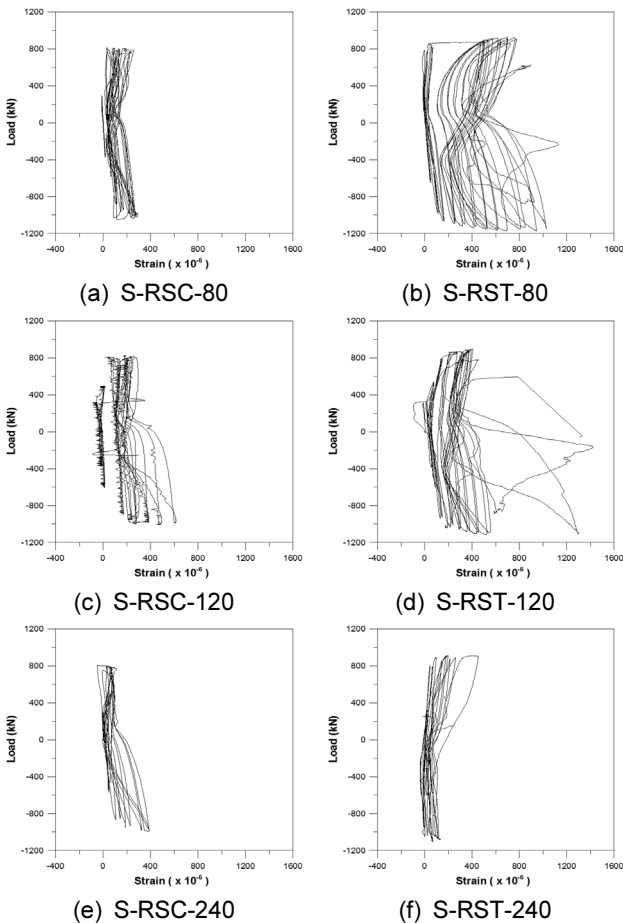


Fig. 10 Lateral load-strain curves of transverse reinforcement (OT1)

위와 같은 실험결과를 분석을 통해 삼각망 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥은 삼각망 보강 횡철근에 의해 축방향 철근의 좌굴을 방지하는 뛰어난 거동특

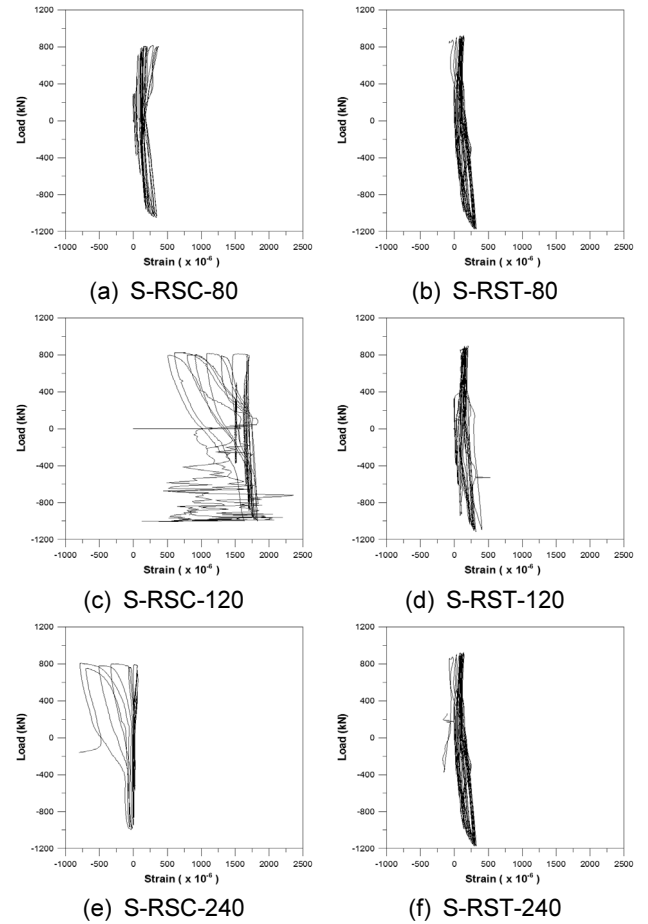


Fig. 11 Lateral load-strain curves of transverse reinforcement (CL1)

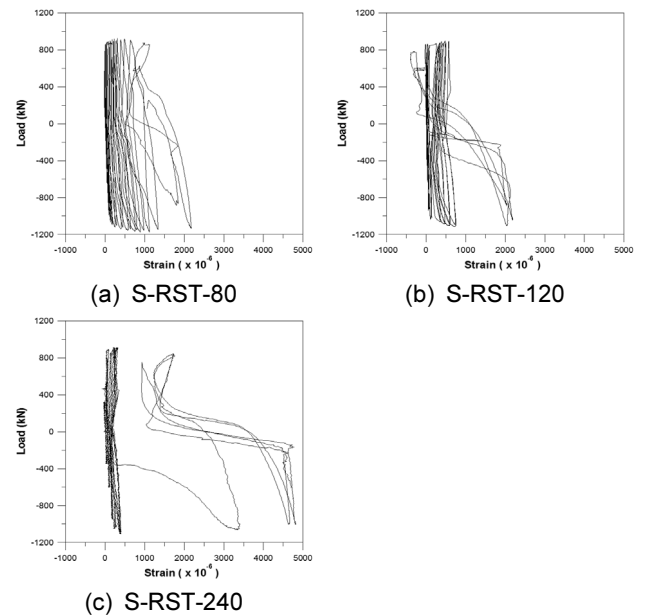


Fig. 12 Lateral load-strain curves of transverse reinforcement (CT1)

성으로 기존 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥과 강도, 연성, 에너지 소산능력 등의 면에서 동등 이상의 우수한 성능을 보이고 있음이 확인되었다.

3. 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥의 비선형 해석

3.1 개요

이 연구에서는 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소, 그리고 경계면요소 등⁹⁻¹⁴⁾을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP ver. 7.2¹⁵⁾에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)에 삼각망 철근상세를 갖는 중실 단면의 구속효과를 고려할 수 있도록 수정을 가하여 사용하였다(Fig. 13). 이때 철근콘크리트의 비선형 재료모델은 저자 등에 의한 재료모델⁹⁻¹⁴⁾을 그대로 적용하기로 하며 중실 단면의 구속효과는 콘크리트의 단면형상에 관계없이 적용할 수 있고, 축방향 철근 및 구속철근의 양, 구속철근의 항복강도 및 배근형태 등을 고려할 수 있도록 한 Mander et al.¹⁶⁾의 제안모델을 수정하여 이식하였다.

횡방향철근에 의한 횡구속력은 유효구속력으로 결정되므로 단면형상과 횡방향철근량이 지배적인 요소가 된다. 그리고 동일한 횡방향철근량을 제공하더라도 설치간격, 배치형태, 갈고리 상세 등의 차이에 의해 유효구속력에 차이가 있게 된다.

3.2 해석결과 및 분석

Fig. 14는 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소 분할한 예이다. 이산균열개념에 근거한 경계면 요소는 기본적으로 요소의 평행 및 직각방향으로만 응력이 발생하는 것으로 가정하고 있기 때문에 철근과 콘크리트의 재료 모델을 그대로 적용할 수 있다. 그러나 경계면 요소의 변형은 인접한 두 부재간의 상대변위로부터 결정되기 때문에 요소의 응력-변형률 관계는 압축응력-압축변위 및 전단

2D or 3D Spring element	4 nodes PSC shell element	2D or 3D Flexibility-based fiber beam-column element	4 nodes Elastic shell element
Joint element	FEAP		4 nodes RC shell element
Reinforcing or Prestressing bar element	Interface element	RC plane stress element	2D Elasto-plastic plane stress element

Fig. 13 Nonlinear finite element analysis program

응력-전단미끄러짐의 관계로 정의된다. 이때 경계면 요소의 총 전단변위는 접합면에서의 미끄러짐과 국소적인 응력집중의 영향으로 인한 변위의 합으로 표현하였다. 그리고 사용된 유한요소망은 일반 탄성해석과의 수렴성 시험 (convergence test) 결과 형상비(aspect ratio)에 의한 영향은 1.0% 미만이었으며 이는 콘크리트 구조의 비선형해석에서

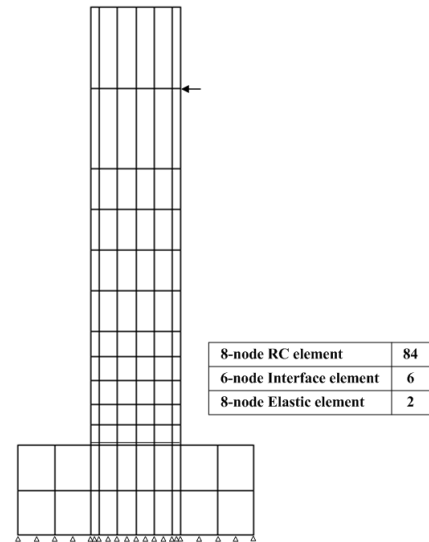
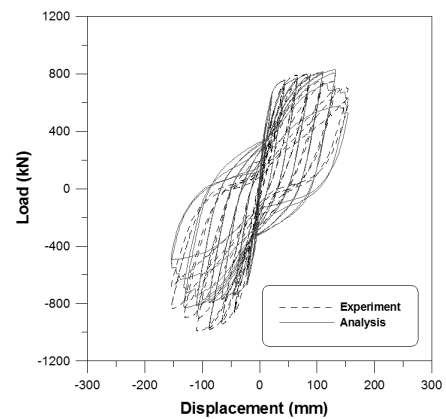
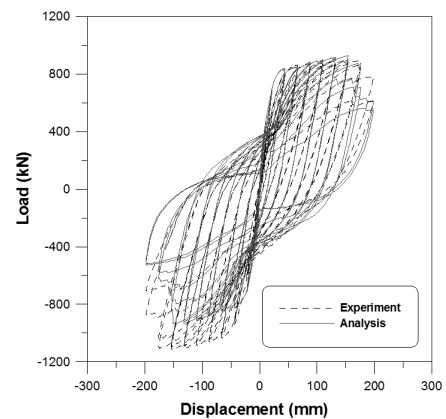


Fig. 14 Finite element mesh for specimens



(a) S-RSC-240



(b) S-RST-120

Fig. 15 Comparison of results from the experimental results

예상되는 오차에 비하여 매우 작은 것으로 나타나 그 타당성이 검증되었다.

Fig. 15는 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계의 예를 나타내고 있으며 해석결과가 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 해석결과는 실험 결과와 재하, 제하, 그리고 재재하시의 거동면에서 잘 일치하고 있으며 실험체에 반복 주기 하중이 진행되는 동안 소성흔지 영역에서 비탄성 변형이 증대됨에 따라 일어나는 콘크리트의 균열과 파쇄, 그리고 이로 인한 손상이나 파괴와 잘 일치하고 있다.

위와 같은 해석결과로부터 개발된 삼각망 물량저감 철근상세는 기존 철근상세와 강도, 연성 등의 면에서 동등이상의 성능을 보이고 있으며 그 적용성이 확인되었다.

4. 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥의 내진성능평가

4.1 개요

최근 철근콘크리트 기둥의 설계는 한계상태설계(Limit State Design) 이론을 도입하여 사용하고 있으며, 이를 기본으로 성능기반설계(Performance Based Design)로 전환하는 과정에 있다. 또한 요구되는 성능기준에 적합한 구조물을 설계하기 위한 기반기술의 개발이 필요시 되고 있다.

성능기반 내진설계는 구조물이 예측 가능한 내진성능을 확보하고 규정된 성능목표를 달성할 수 있도록 하는데 필요한 해석과 설계절차를 포괄하고 있는 내진설계 방법이다. 즉 예상되는 지진하중에 대하여 주어진 조건에서 허용할 수 있는 적절한 피해정도 혹은 에너지 흡수정도를 미리 설정하고, 이를 달성하도록 하는 설계법이다.¹⁷⁾

이러한 성능기반 내진설계 체제는 손상상태의 정량화가

필수적이며 확장된 지진손상 평가법¹¹⁾을 통해서 얻을 수 있다. 손상지수는 유한요소해석에서 필연적으로 계산되는 가우스 적분점에서의 변형률을 이용하여 해석단계별로 직접 산정할 수 있으며 철근과 콘크리트의 극한변형률에 근거한 파괴기준을 토대로 하고 있다. 이때 손상상태는 한 개 또는 그 이상의 한계상태에 의해 결정되고 각각은 성능수준을 규정할 수 있다. 완전기능 수준은 손상이 거의 발생하지 않아 보수가 요구되지 않는 상태이며 기능수행 수준은 경미한 손상이 발생하여 보수가 필요한 상태이다. 그리고 붕괴방지 수준은 심각한 손상이 발생하여 부분 또는 전체적인 보수·보강이 필요한 상태를 의미한다.

이 연구에서는 위와 같이 기존의 손상지수를 이용한 내진성능평가 기법¹²⁾을 확장하고 적용하여 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥의 내진성능 평가를 가능하도록 하였다.

4.2 내진성능평가

Table 3은 하중재하에 따른 손상지수의 변화를 실험결과 및 성능수준과 함께 비교하여 기둥실험체의 내진성능평가를 나타내고 있다.

이 연구에서 수행된 내진성능평가 예로서 단부구역에 내측 횡철근을 약 70% 감축하여 배근한 기존 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체(S-RSC-240)의 실험결과를 재하 단계별로 기술하면 다음과 같다(Table 3). Drift 0.50%에서 기둥 전면에 미세한 수평 휨균열이 생기며, 1.0%에서는 소성흔지부의 휨 균열이 진전하였다. 1.5%에서 재하방향과 평행한 면에 경사 균열이 발생하였으며, 2.0%에서는 수직균열이 발생하였다. 2.5%에서 기초로부터 약 300 mm 높이에 걸쳐 콘크리트 파괴가 박리되었으며, 3.0%에서는 축방향 철근의 좌굴이 발생하였다. 3.5%

Table 3 Comparative evaluation of progressive damage

Drift (%)	S-RSC-80		S-RST-80		S-RSC-120		S-RST-120		S-RSC-240		S-RST-240	
	Exp.	Ana.	Exp.	Ana.	Exp.	Ana.	Exp.	Ana.	Exp.	Ana.	Exp.	Ana.
0.25		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00
0.50	□	0.04	□	0.04	□	0.04	□	0.03	□	0.06	□	0.05
1.00		0.09		0.07		0.08		0.06		0.13		0.08
1.50	■	0.25	■	0.23	■	0.20	■	0.20	■	0.26	■	0.22
2.00		0.36		0.31		0.34		0.34		0.35		0.32
2.50		0.49		0.40	◎	0.43		0.44	◎	0.46		0.42
3.00	◎	0.57		0.46	○	0.64	◎	0.55	○	0.64	◎	0.50
3.50	○	0.69	◎	0.52		1.00	○	0.75	●	1.00	○	0.69
4.00		1.00		0.61		1.00		1.00			●	1.00
4.50	●	1.00	○	0.77	●	1.00	●	1.00				
5.00				1.00								
5.50			●	1.00								

(Note) First cracking - □, Open cracks - ■, Spalling - ◎, Buckling - ○, Fracture - ●

(1 cycle)에서 축방향 철근의 좌굴이 진전되었고, 3.5% (2 cycle)에서는 축방향 철근이 여러 개 파단이 일어나 실험을 종료하였다. 이에 대하여 해석결과의 재하 단계별 손상지수 값은 drift 0.5%에서 0.06, 1.0%에서 0.13, 1.5%에서 0.26, 2.0%에서 0.35, 2.5%에서 0.46, 3.0%에서 0.64, 그리고 3.5%에서 1.00을 나타내고 있다. 이 해석결과에 나타난 손상지수의 값을 성능평가 기법으로 표현하면, drift 0.5%에서는 완전기능 수준으로 손상이 거의 발생하지 않아 보수가 요구되지 않는 상태이다. Drift 2.0%에서는 기능수행 수준으로 경미한 손상이 발생하여 보수가 필요한 상태이다. Drift 3.0%에서는 붕괴방지 수준으로 심각한 손상이 발생하여 부분 또는 전체적인 보수·보강이 필요한 상태를 의미한다.

하중재하에 따른 요소레벨의 손상지수의 변화를 나타내는 Fig. 16은 이 실험의 변수로 사용한 기존 철근상세를 개발된 삼각망 철근상세에 따른 기둥 실험체의 거동특성을 비교한 것으로 실험결과를 해석결과가 잘 묘사하고 있다(Table 3).

중실 사각형 기둥 실험체 해석결과의 재하 단계별 손상지수 값의 예를 확인해보면 drift 0.5%에서 S-RSC-80 실험체는 0.04, S-RST-80 실험체는 0.04이다. Drift 1.5%에서 S-RSC-80 실험체는 0.25, S-RST-80 실험체는 0.23이다. Drift 2.5%에서 S-RSC-80 실험체는 0.49, S-RST-80 실험체는 0.40이다. Drift 3.5%에서 S-RSC-80 실험체는 0.69, S-RST-80 실험체는 0.52이다. 그리고 drift 4.5%에서 S-RSC-80 실험체는 1.00, S-RST-80 실험체는 0.77이다.

즉 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 S-RST-80 실험체가 기존 철근상세를 갖는 S-RSC-80 실험체보다 동일한 하중 단계에서 손상이 지연되고 있음을 확인할 수 있다. 또한 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 S-RST-120 실험체 및 S-RST-240 실험체가 기존 철근상세를 갖는 S-RSC-120 실험체 및 S-RSC-240 실험체보다 동일한 하중단계에서 손상이 지연되고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 손상의 주요 원인이 축방향 철근의 좌굴에 의한 것인데 삼각망 철근상세를 갖는 실험체는

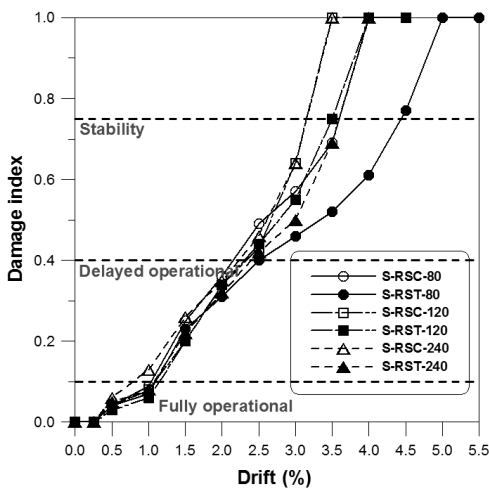


Fig. 16 Assessment of performance level

삼각망 보강 횡철근에 의해 축방향 철근의 좌굴을 직접적으로 방지하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

실험결과와 해석결과의 비교로부터 이 연구에서 제안하고 있는 방법은 지진하중과 같은 반복하중에 의한 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥의 비탄성 이력거동을 적절히 평가하고 있으며, 개발된 철근콘크리트 구조물의 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 이용함으로써, 해석적 방법에 의한 신설 또는 기존 중실 철근콘크리트 기둥의 내진성능평가가 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 연구에서는 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥의 성능검증을 위하여 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체에 대한 실험적, 해석적 연구가 수행되었으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실험적, 해석적 연구로부터 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥은 설계된 값을 잘 반영하고 있으며 삼각망 보강 횡철근에 의해 축방향 철근의 좌굴을 방지하는 뛰어난 거동특성으로 기존 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥에 비해 동등 이상의 소요성능을 갖고 있는 것으로 확인되었다.
- 2) 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥 단면은 기존 철근상세를 갖는 중실 기둥단면과 동등 이상의 연성능력을 나타내고 있으며, 최대하중 도달후 하중의 급격한 감소현상을 보이지 않고 있다.
- 3) 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체는 기존 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥 실험체에 비해 하중단계별로 동등 이상의 에너지 소산능력을 보이고 있는 것으로 나타나고 있다.
- 4) 개발된 삼각망 철근상세를 하중단계별 철근의 변형을 변화 등을 통해 기존 철근상세와 비교·분석한 결과 전반적으로 유사한 거동특성을 보이고 있어 그 적용성이 확인되었으며 경제적인 중실 단면의 도출로 중실 기둥의 물량감축을 실현할 수 있고 이에 따라 시공원가를 절감하고 탄소배출을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 배근작업이 불편한 보강 띠철근을 생략 내지 감축할 수 있기 때문에 시공과정에서 철근 배근의 시공성을 향상시킬 수 있으며, 공기 단축을 실현할 수 있을 것으로 판단된다.
- 5) 이 연구에서 비선형 유한요소해석 결과는 전반적으로 실험결과를 잘 평가하고 있음이 확인되었다. 이를 통해 제안한 해석기법과 모델은 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥 구조의 전반적인 거동특성을 바르게 표현하고 있음이 입증되었으며 향후 이러한 중실 기둥구조의 정밀해석이 가능할 것으로

판단된다.

- 6) 이 연구에서는 하중 재하에 따른 구조물의 손상정도를 수치적으로 표현하며 전체 구조물의 성능특성을 나타낼 수 있는 손상지수에 의한 내진성능평가기법을 이용하여 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥의 내진성능을 비교적 정확하게 평가하였다. 이를 통해 성능기반 내진설계개념에 접목하여 비선형 유한요소해석을 이용한 합리적이고 경제성 있는 차세대 내진설계법의 개발 등에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.
- 7) 향후 삼각망 철근상세를 갖는 중실단면의 내진설계기준을 정립하기 위해서는 단면형상, 축력비, 축방향 철근비 등 제원특성에 따른 매개변수 연구를 통하여 거동특성을 심도 있게 규명할 필요가 있다. 그리고 개발기술의 적용과 성능향상을 통하여 삼각망 철근상세를 갖는 중실 사각형 철근콘크리트 기둥의 설계 및 시공기법을 완성할 수 있을 것으로 기대된다.

References

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. *Korea Highway Bridge Design Code (Limit State Design Method)*, 2015.
2. Korea Concrete Institute. *Concrete Structural Design Code*, 2012.
3. Kim, T. H., Lee, J. H., and Shin, H. M., "Hollow Reinforced Concrete Bridge Column Systems with Reinforcement Details for Material Quantity Reduction: I. Development and Verification", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.18, No.1, 2013, pp.1-8.
4. Kim, T. H., Kim, H. Y., Lee, J. H., and Shin, H. M., "Hollow Reinforced Concrete Bridge Column Systems with Reinforcement Details for Material Quantity Reduction: II. Experiments and Analyses", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.18, No.1, 2013, pp.9-18.
5. AASHTO. *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, 6th Edition, 2012.
6. Park, K. S., Seo, H. Y., Kim, I. H., and Sun, C. H., "Seismic Behaviors of Circular RC Bridge Columns by Lap-splices Length of Longitudinal Reinforcements - An Analytical Study", *Proceedings of EESK Conference*. Vol.16, 2012, pp.79-82.
7. Kim, I. H., Sun, C. H., Lee, S. H., Park, K. S., and Seo, H. Y., "Seismic Behaviors of Circular Sectional RC Bridge Columns with Various Lap-splice Lengths - An Experimental Study", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.16, No.6, 2012, pp.47-56.
8. Park, R., "Ductility Evaluation from Laboratory and Analytical Testing", *Proc. of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol.VII, Balkema, Rotterdam, 1988, pp.605-616.
9. Kim, T. H., and Shin, H. M., "Analytical Study on Discontinuous Displacement in Reinforced Concrete Column-Footing Joint under Earthquake", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.12, No.6, 2000, pp.83-90.
10. Kim, T. H., Lee, S. C., and Shin, H. M., "Analytical Study on Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Bridge Piers under Earthquake", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.13, No.4, 2001, pp.389-396.
11. Kim, T. H., Lee, K. M., Chung, Y. S., and Shin, H. M., "Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Bridge Columns", *Engineering Structures*, Vol.27, No.4, 2005, pp.576-592.
12. Kim, T. H., Kim, Y. J., Kang, H. T., and Shin, H. M., "Performance Assessment of Reinforced Concrete Bridge Columns Using a Damage Index", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.34, No.7, 2007, pp.843-855.
13. Kim, T. H., Choi, J. H., Lee, J. H., and Shin, H. M., "Performance Assessment of Hollow RC Bridge Column Sections with Reinforcement Details for Material Quantity Reduction", *Magazine of Concrete Research*, Vol.65, No.21, 2013, pp.1277-1292.
14. Kim, T. H., Lee, J. H., and Shin, H. M., "Performance Assessment of Hollow Reinforced Concrete Bridge Columns with Triangular Reinforcement Details", *Magazine of Concrete Research*, Vol.66, No.16, 2014, pp.809-824.
15. Taylor, R. L., *FEAP - A Finite Element Analysis Program*, Version 7.2. Users Manual, Volume 1 and Volume 2. 2000.
16. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., "Theoretical Stress-strain Model for Confined Concrete", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.114, No.8, 1988, pp.1804-1826.
17. Applied Technology Council. *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, ATC-40 Report, Redwood City, California, 1996.

요약 이 연구의 목적은 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥의 성능을 파악하는데 있다. 제안된 철근상세는 경제성과 합리성을 갖으며 공사기간의 단축을 가져올 수 있다. 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥 실험체에 일정 축하중 하에서 횡방향 반복하중을 가하는 준정적 실험을 수행하였다. 사용된 프로그램은 철근콘크리트 구조물의 해석을 위한 RCAHEST이다. 사용된 해석기법은 조사된 실험체에 대하여 하중단계에 따라 성능을 비교적 정확하게 예측하였다. 그 결과 제안된 삼각망 철근상세는 기존 철근상세와 동등 이상의 소요성능을 보임을 확인하였다.

핵심용어 : 삼각망, 철근상세, 중실, 기둥, 성능, 경제성, 준정적 실험