

# 비선형 지진해석을 통한 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥의 성능평가

## Performance Assessment of Solid Reinforced Concrete Columns with Triangular Reinforcement Details Using Nonlinear Seismic Analysis

김태훈<sup>1)\*</sup> · 나경웅<sup>1)</sup> · 신현목<sup>2)</sup>

Kim, Tae-Hoon<sup>1)\*</sup> · Ra, Kyeong-Woong<sup>1)</sup> · Shin, Hyun-Mock<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>삼성물산(주) 품질기술실, <sup>2)</sup>성균관대학교 건설환경공학부

<sup>1)</sup>Quality Technology Division, Samsung C&T Corporation, <sup>2)</sup>Architectural and Civil Engineering Department, Sungkyunkwan University

### / A B S T R A C T /

This study investigates the seismic performance of solid reinforced concrete columns with triangular reinforcement details using nonlinear seismic analysis. The developed reinforcement details are economically feasible and rational, and facilitate shorter construction periods. By using a sophisticated nonlinear finite element analysis program, the accuracy and objectivity of the assessment process can be enhanced. Solution of the equations of motion is obtained by numerical integration using Hilber-Hughes-Taylor (HHT) algorithm. The proposed numerical method gives a realistic prediction of seismic performance throughout the input ground motions for several column specimens. As a result, developed triangular reinforcement details were designed to be superior to the existing reinforcement details in terms of required performance.

**Key words:** Nonlinear seismic analysis, Triangular reinforcement details, Solid columns, Seismic performance, Economically feasible, Assessment process

## 1. 서론

이 연구는 기존 연구[1, 2]에서 개발된 삼각망 보강 횡철근을 확장 적용하여 단면을 가로지르는 보강 띠철근의 생략을 실현한 새로운 철근 배근상세와 시공방법을 갖는 중실 철근콘크리트 기둥[3]의 지진응답을 해석적으로 예측하고 그 내진성능을 평가하는데 목적이 있다. 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥은 물량저감을 통한 경제성과 합리성을 가지며 배근작업이 용이하고 급속시공이 가능하다.

기둥의 내진성능을 평가하기 위한 실험으로는 준정적 실험, 유사동적 실험, 그리고 진동대 실험이 있으며 국내에서는 주로 준정적 실험 및 유사동적 실험이 수행되어 왔다[4, 5]. 진동대 실험은 국내에 있는 진동대 용량의 한계로 기둥의 축소모형의 경우도 수행이 쉽게 이루어지기 힘든 여건이다. 따라서 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥 시스템의 진

동대 실험을 대체할 수 있는 비선형 지진해석 기법 개발이 이루어진다면, 여러 형태의 기둥에 대한 비선형 지진해석을 실시하여 미처 다루지 못한 형태를 갖는 기둥들의 내진성능평가가 가능할 것이다.

진동대 실험에는 지금까지 주로 원역지진지반가속도(far field ground motion)를 지반운동으로 다루어 왔다. 그러나 최근 Northridge 지진(1994), Hyogo-ken Nanbu 지진(1995), Kocaeli 지진(1999), Duzce 지진(1999), Chi-Chi 지진(1999) 등에서 근단층지반운동(near fault ground motion)으로 밀집된 도심지역의 심각한 손상과 피해가 발생하고 있으며 이에 따라 근단층지반운동의 영향에 대한 관심이 높아지고 있다.

따라서 기둥의 내진성능평가에서 사용하는 지반운동을 이러한 근단층 지반운동에 대해서도 반드시 검토할 필요가 있다. 근단층지반운동은 큰 진폭의 장주기 속도 펄스를 갖는 특징을 갖고 일반적으로 진앙거리가 약 10 km 이내인 지역에서 관측되는 지진지반운동을 말한다. 그리고 근단층지반운동은 단층파열의 전파와 전단파의 전파가 서로 간섭을 일으켜 발생하며 근단층운동이 진행되는 방향에 평행인 경우와 직각인 경우로 구분된다[6].

이 연구에서는 국내에서 수행된 근단층지반운동에 대한 모델링 연구[7]에서 도출된 지반운동중 근단층운동이 진행되는 방향에 직각인 경우를 이

\*Corresponding author: Kim, Tae-Hoon

E-mail: th1970.kim@samsung.com

(Received June 23, 2016; Revised September 7, 2016; Accepted October 12, 2016)

용하여 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥[3]의 비선형 지진해석을 수행하고 그 내진성능을 평가하였다.

## 2. 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥

삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥 시스템[3]은 Fig. 1(a)와 같이 기둥 단면을 가로지르는 보강 띠철근 때문에 시공성이 떨어지는 단점을 Fig. 1(b)와 같이 축방향으로 배근되는 외측 축방향철근과 그 사이에 위치하는 내측 축방향 철근, 외측 축방향철근 바깥에 배근되는 외측 횡철근, 그리고 삼각망 보강 횡철근으로 구성되는 새로운 삼각망 철근상세로 해결하였다.

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

이러한 삼각망 철근상세는 축방향철근, 횡철근, 보강 횡철근을 매개변수로 전용 유한요소해석 프로그램을 이용한 비선형 해석 등을 통해 가장 적

절한 형태로 개발되었다.

이 연구의 목적인 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥의 내진성능을 파악하기 위해서 Table 1에 나타난 것과 같은 선행 연구[3]의 기둥 실험체를 선정하였으며 실험체의 예는 Fig. 2에 나타내었다. 이때 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥 실험체의 설계는 현행 도로교 설계기준(한계상태설계법)[8], 콘크리트구조기준[9], 그리고 AASHTO LRFD[10]를 근거로 하였다.

선정된 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 힘과 좌우를 유도하기 위하여 형상비를 4.0로 결정하였으며 준정적 실험에 대한 세부적인 실험결과는 참고문헌[3]에 자세히 설명되어 있다.

대표적인 연구결과를 Fig. 3에 나타내었으며 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥은 기존 기둥 단면을 가로지르는 보강 띠철근을 갖는 중실 철근콘크리트 기둥과 강도, 연성, 에너지 소산능력 등의 면에서 동등 이상의 성능을 보이고 있음이 선행연구[3]를 통해 확인되었다.

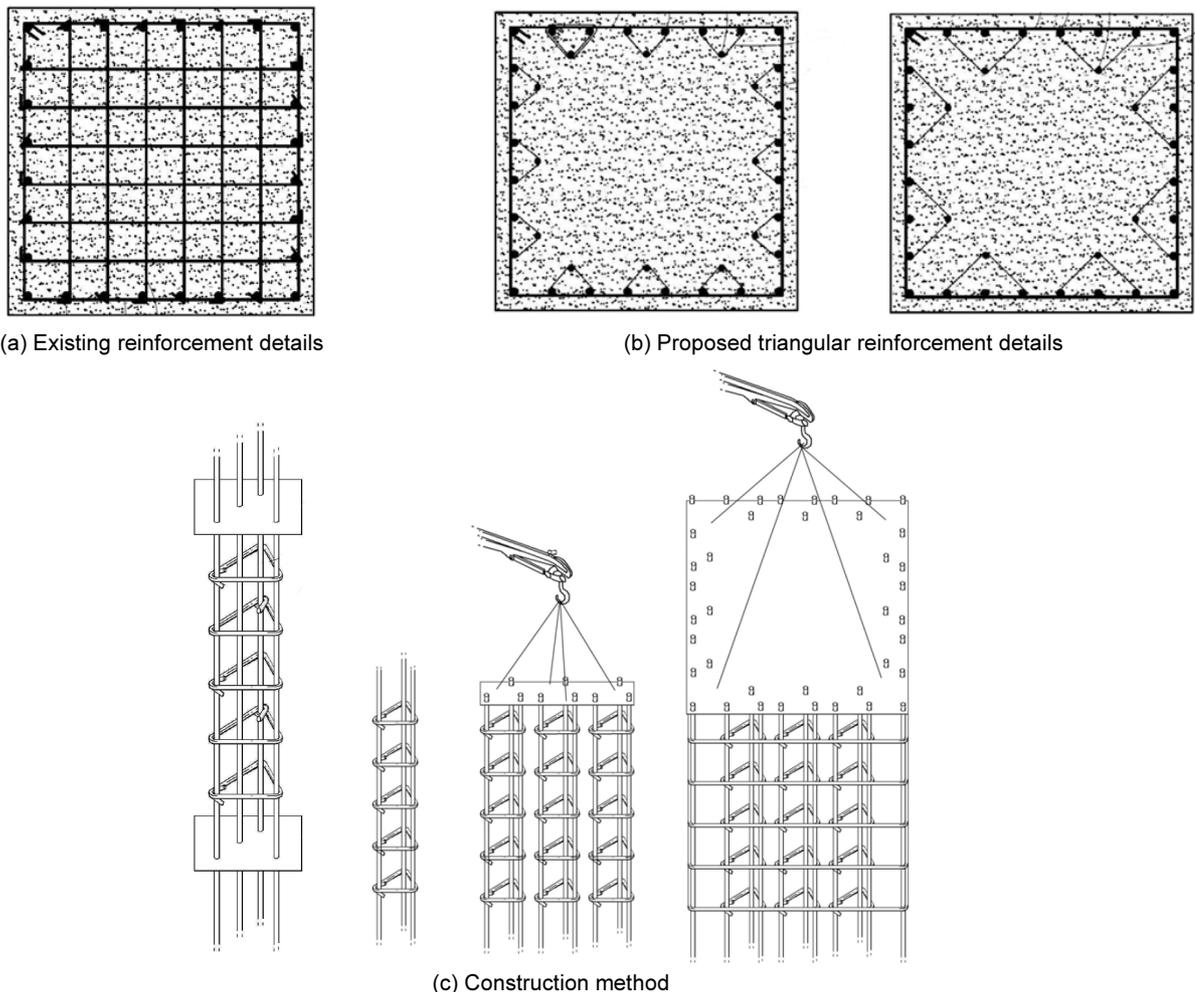
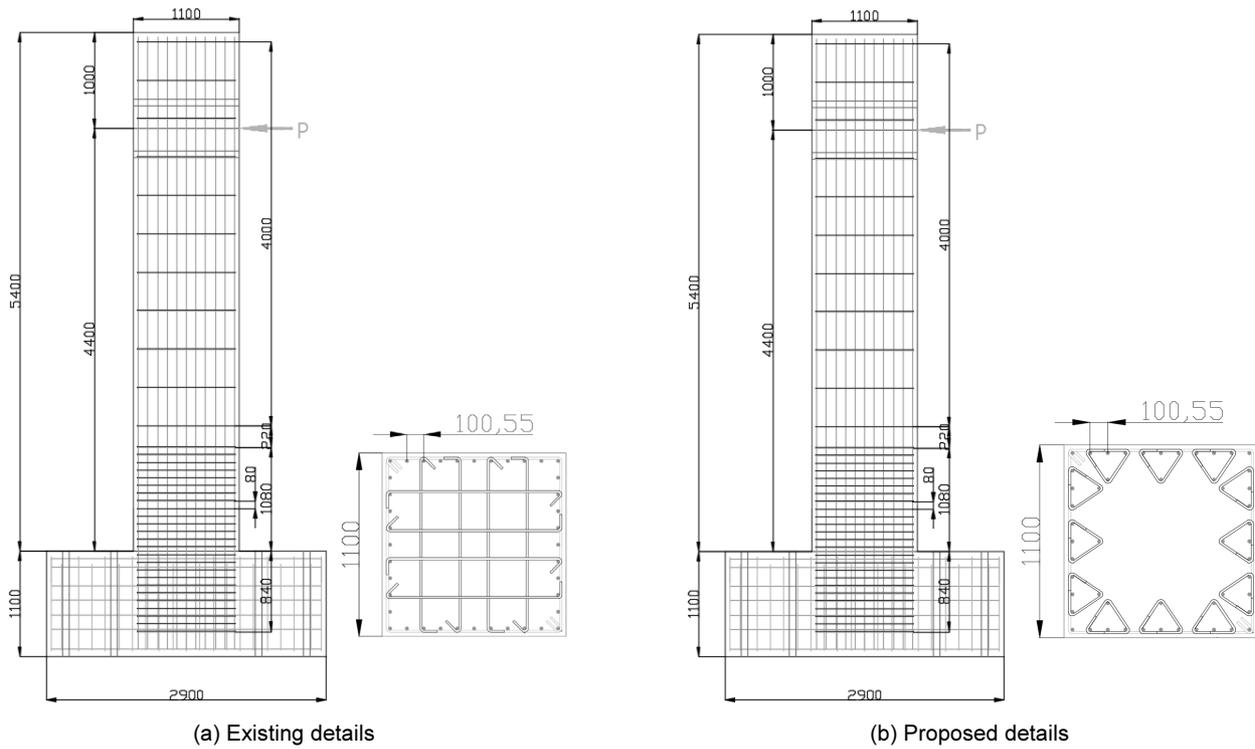


Fig. 1. Solid reinforced concrete columns with triangular reinforcement details [3]

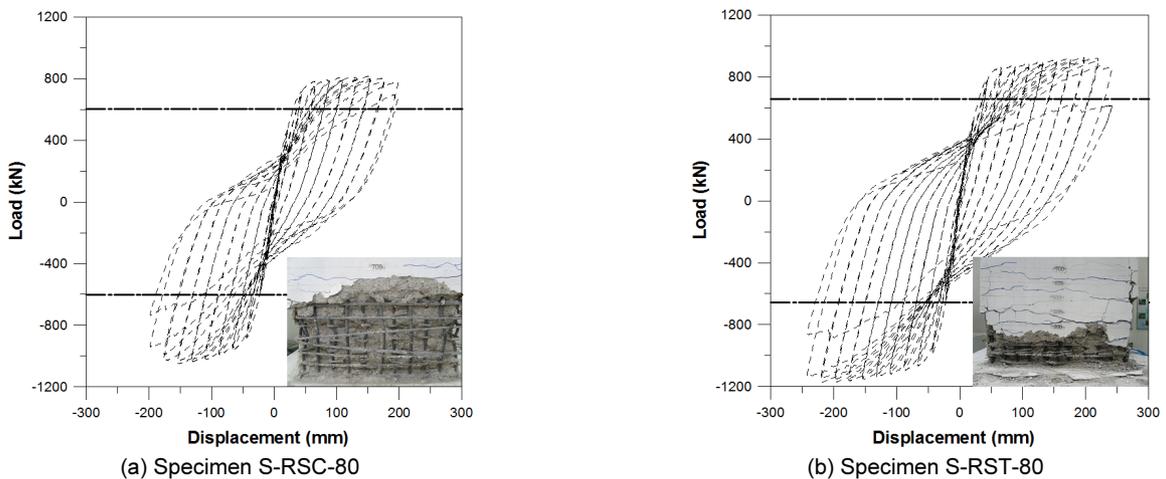
**Table 1.** Properties of test specimens [3]

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

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



**Fig. 2.** Solid reinforced concrete column specimen (Unit: mm)[3]



**Fig. 3.** Lateral load-displacement relationship [3]

### 3. 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥의 지진해석

이 연구에서는 개발된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology) [11-15]에 삼각망 철근상세를 갖는 중실 단면의 구속효과를 고려할 수 있도록 수정을 가하여 사용하였다. RCAHEST는 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP ver. 7.2(16)에 저자 등에 의하여 개발된 철근콘크리트 평면응력요소, 경계면요소 등[11-15]을 이식한 프로그램이다.

철근콘크리트의 비선형 재료모델은 기존의 재료모델[11-15]을 그대로 적용하였으며 중실 단면의 구속효과는 콘크리트의 단면형상에 관계없이 적용할 수 있고 축방향 철근 및 구속철근의 양, 구속철근의 항복강도 및 배근형태 등을 고려할 수 있도록 한 Mander 등의 제안모델[17]을 수정하여 삼각망 철근상세를 갖는 중실 단면의 구속효과를 고려하였다. 이때 삼각구도의 보강횡철근의 양은 x, y 방향으로 각각 나누어 산정하였으며 많은 경우에 대한 해석결과[2], [3], [15]로부터 그 타당성이 검증되었다.

비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소 분할한 예를 Fig. 4에 나타내었다. 이때 사용된 경계면 요소는 이산균열개념에 근거하고 있으며 기본적으로 요소의 평행 및 직각방향으로만 응력이 발생하는 것으로 가정하고 있기 때문에 기존의 철근과 콘크리트의 재료모델을 그대로 적용할 수 있다.

이 연구의 해석모델을 적용한 비선형 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계의 예를 Fig. 5에 나타내었으며 해석결과는 실험 결과와 재

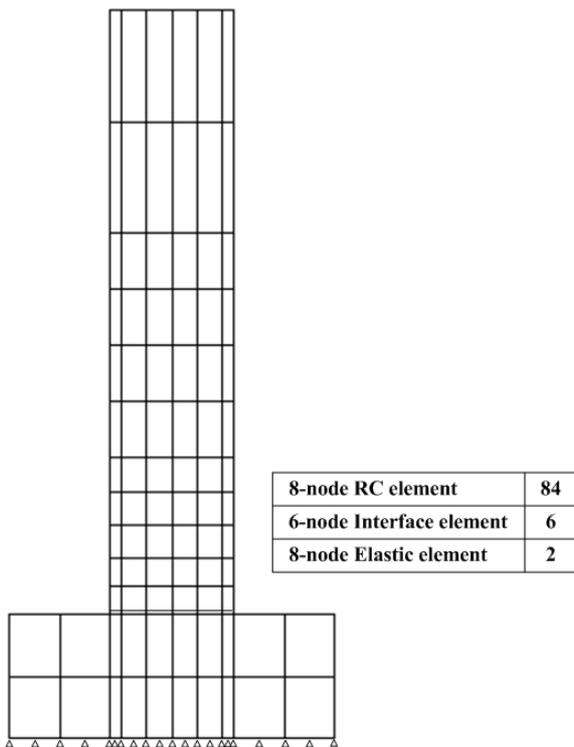


Fig. 4. Finite element mesh for specimens

하, 제하, 그리고 재재하시의 거동면에서 거의 일치하고 있다. 이때 최대하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 0.97과 0.02이고 실험체에 반복 주기하중이 진행되는 동안 소성힌지 영역에서 비탄성 변형이 증대됨에 따라 일어나는 콘크리트의 균열과 파쇄, 그리고 이로 인한 손상이나 파괴 등을 잘 모사하고 있다.

지진하중을 받는 철근콘크리트 기둥의 내진성능을 근단층지반운동에 대해서 평가하기 위해 축소모형을 제작하고 축력효과는 프리스트레스에 의해 구현하며 질량 효과는 별도의 질량모사 Fig. 6과 같은 프레임을 제작하여 수행한 실험 및 해석결과[4, 14]를 근거로 진동대 실험을 모사하여 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥의 비선형 지진해석을 수행하였다.

국내에서 중규모지진에 의한 근단층지반운동 모델을 수행하여 얻어진 지반운동 결과[7]를 이용하였고 단계별로 가속도 수준을 높이면서 파괴에

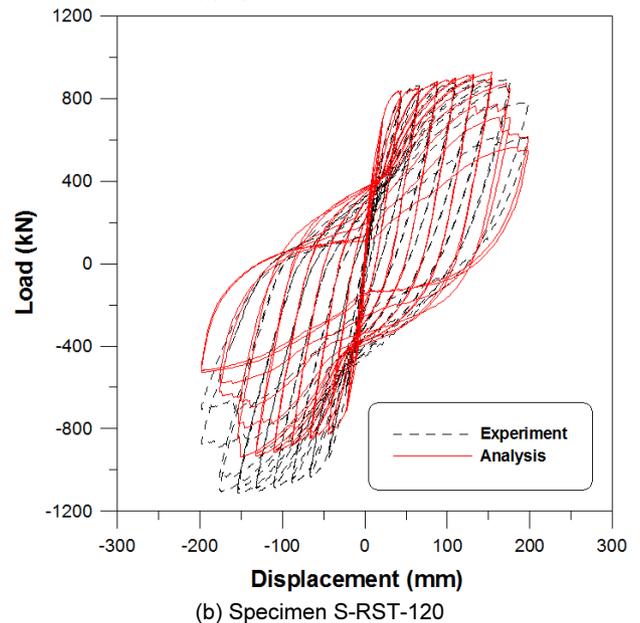
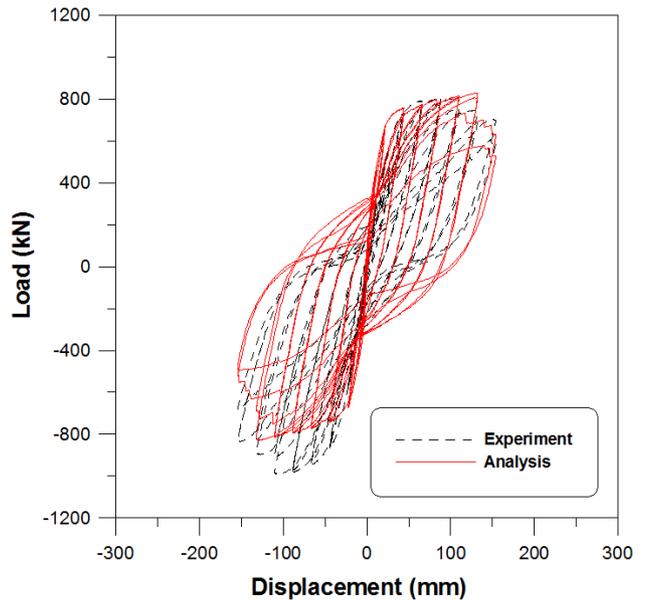


Fig. 5. Comparison of results from the experimental results [3]



Fig. 6. Sample test setup [14]

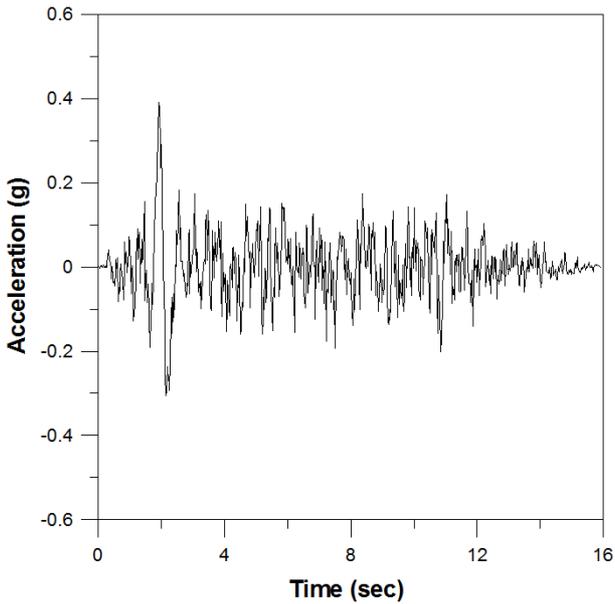


Fig. 7. Artificial ground acceleration [14]

이르도록 하였다. 사용한 근단층지반운동은 중규모지진에 의해서 생성된 것으로 0.0627 g, 0.0803 g, 0.11 g, 0.154 g, 0.22 g, 0.3 g, 0.4 g, 0.5 g, 0.6 g, 0.7 g, 0.8 g, 0.9 g까지 가진을 실시하였다. 즉 Fig. 7과 같은 입력지진파의 최대가속도 크기를 조정하여 비선형 지진해석을 위한 지진파를 결정하였다. 이때 입력지진파에 대한 정규화 가속도 응답스펙트럼을 설계 응답스펙트럼과 함께 비교하여 Fig. 8에 나타내었다.

이 연구에서 구조물의 비선형응답은 동적 증분 평형방정식의 수치적분 과정과 수렴에 도달하기 위한 반복계산과정을 거침으로써 해를 구하였으며 실제 많이 이용되고 있는 직접적분해석법인 Hilber-Hughes-Taylor (HHT) 법[18]을 선택하였다. HHT 법은 기존의Newmark 법이 갖고 있는 단점인 수치적인 감쇠효과를 유도할 때 발생하는 정확도의 감소를 보완한 해석방법으로서 Hughes에 의해 그 수렴성과 안정성이 검증된 직접적분법이다[19].

삼각망 철근상세를 갖는 중실 기둥 실험체의 고유진동수를 측정된 해석

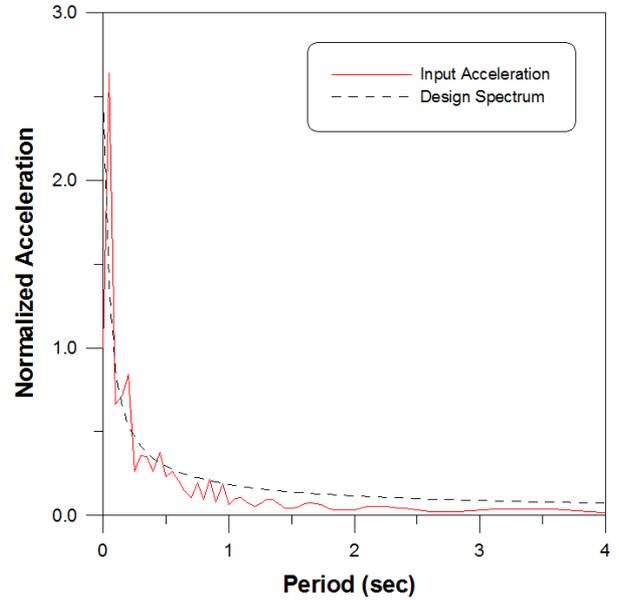


Fig. 8. Response spectrum

Table 2. Natural frequency for specimens

Specimen	Natural frequency (Hz)
S-RSC-80	3.01094
S-RST-80	2.99994
S-RSC-120	2.92668
S-RST-120	2.91500
S-RSC-240	3.04014
S-RST-240	3.03230

결과를 비교하여 Table 2에 나타내었고 감쇠는 3%로 하여 산정한 결과이다. 이러한 고유진동수는 비교검증을 위한 기존 중실 철근콘크리트 기둥 실험체 및 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥 실험체의 비탄성 동적거동 특성을 잘 나타내고 있으며 유사한 응답특성을 갖고 있음을 확인 할 수 있다.

중실 철근콘크리트 기둥구조의 변위와 하중의 이력관계를 관련 실험체 별로 비교하여 Fig. 9 ~ Fig. 11에 나타내었으며 지진응답특성을 전반적으로 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 해석결과는 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥이 기존 중실 철근콘크리트 기둥과 변위와 하중의 주기 및 전체적인 동적거동특성이 유사함을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 각 실험체의 복원력 해석결과의 예를 나타내고 있으며 선행연구[3]의 준정적 실험의 하중-변위 결과를 나타내는 Fig. 3과 거의 유사한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 즉 기존 철근상세를 갖는 실험체(S-RSC-80)의 복원력 해석결과는 814.3 kN이며 실험값은 816.6 kN이고, 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 실험체(S-RST-80)의 복원력 해석결과는 914.0 kN이며 실험값은 923.1 kN이다. 또한 축방향철근의 항복 이후에 잔류변형이 크게 발생하는 등의 비선형 거동특성을 잘 나타내고 있으며 이를 통해 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥은 기존 단면을 가로지르는 보강띠철근을 갖는 중실 철근콘크리트 기둥과 강도, 연성, 에너지 소산능력 등의 면에서 동등 이상의 성능을 보임을 확인할 수 있다.

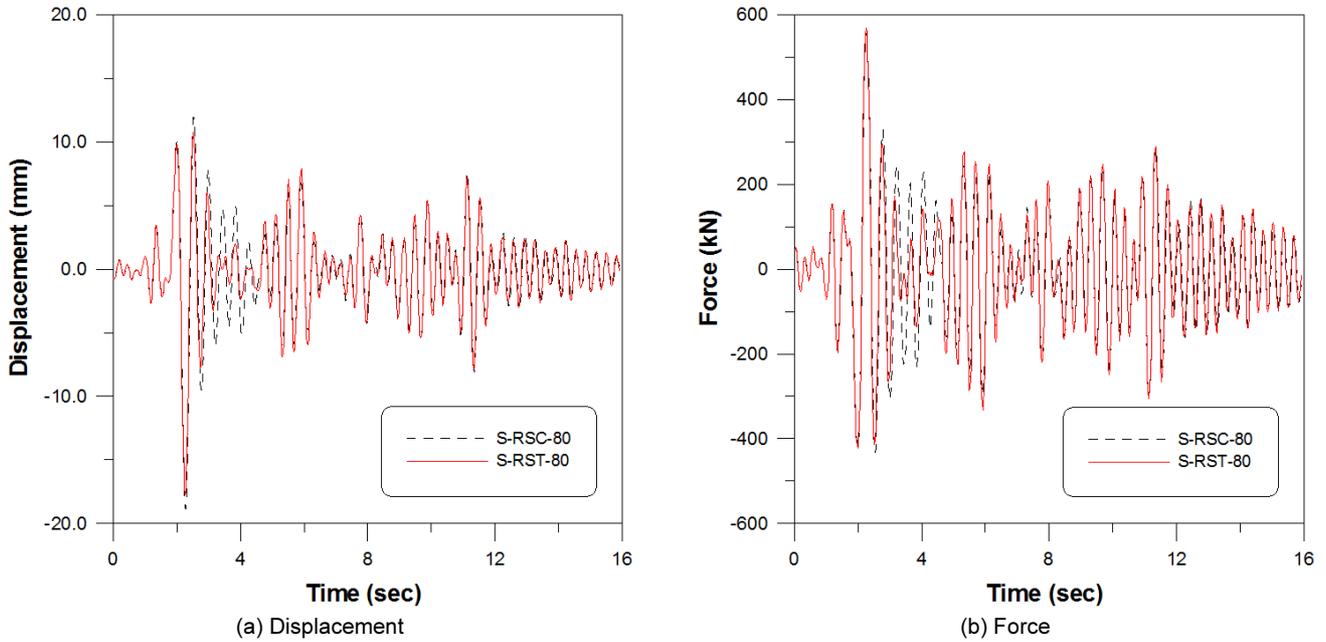


Fig. 9. Response for specimens (PGA 0.154 g)

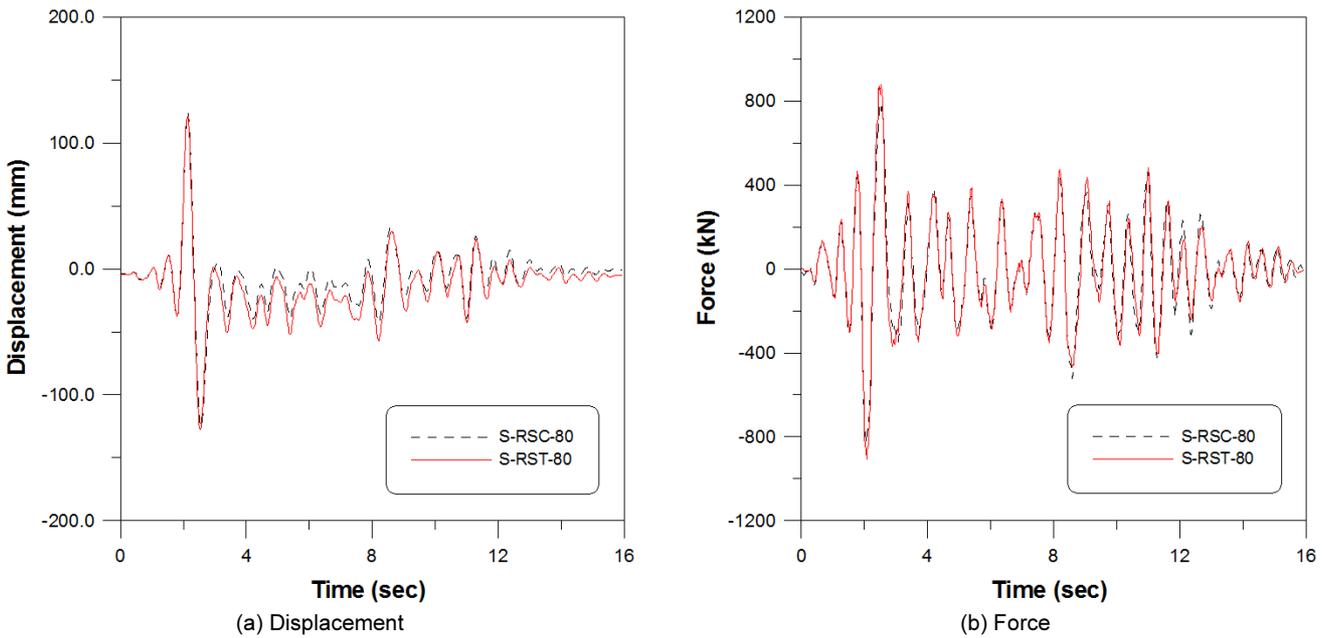


Fig. 10. Response for specimens (PGA 0.5 g)

#### 4. 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥의 내진성능평가

구조물이 예측 가능한 내진성능을 확보하고 규정된 성능목표를 달성할 수 있도록 하는데 필요한 해석과 설계절차를 포괄하고 있는 내진설계 방법이 성능기반 내진설계이며 예상되는 지진하중에 대하여 주어진 조건에서 허용할 수 있는 적절한 피해정도 혹은 에너지 흡수정도를 미리 설정하고 이를 달성하도록 하는 설계법이다[3, 20].

성능기반 내진설계 체제에서 손상상태의 정량화는 필수적이며 Fig. 13

와 같이 확장된 지진손상 평가법[12]을 통해서 얻을 수 있다. 이때 손상지수는 유한요소해석에서 계산되는 가우스 적분점에서의 변형률을 이용하여 해석단계별로 직접 산정할 수 있으며 콘크리트와 철근의 극한변형률에 의한 파괴기준을 근거로 하고 있다(Table 3). 그리고 손상상태는 한 개 또는 그 이상의 한계상태에 의해 결정되고 각각은 성능수준을 규정할 수 있다 (Table 4).

이 연구에서는 위와 같이 기존의 손상지수를 이용한 내진성능평가 기법 [13]을 확장·적용하여 지진하중을 받는 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥의 내진성능 평가를 가능하도록 하였다.

입력지진파에 따른 손상지수의 변화를 성능수준과 함께 Table 5와 같

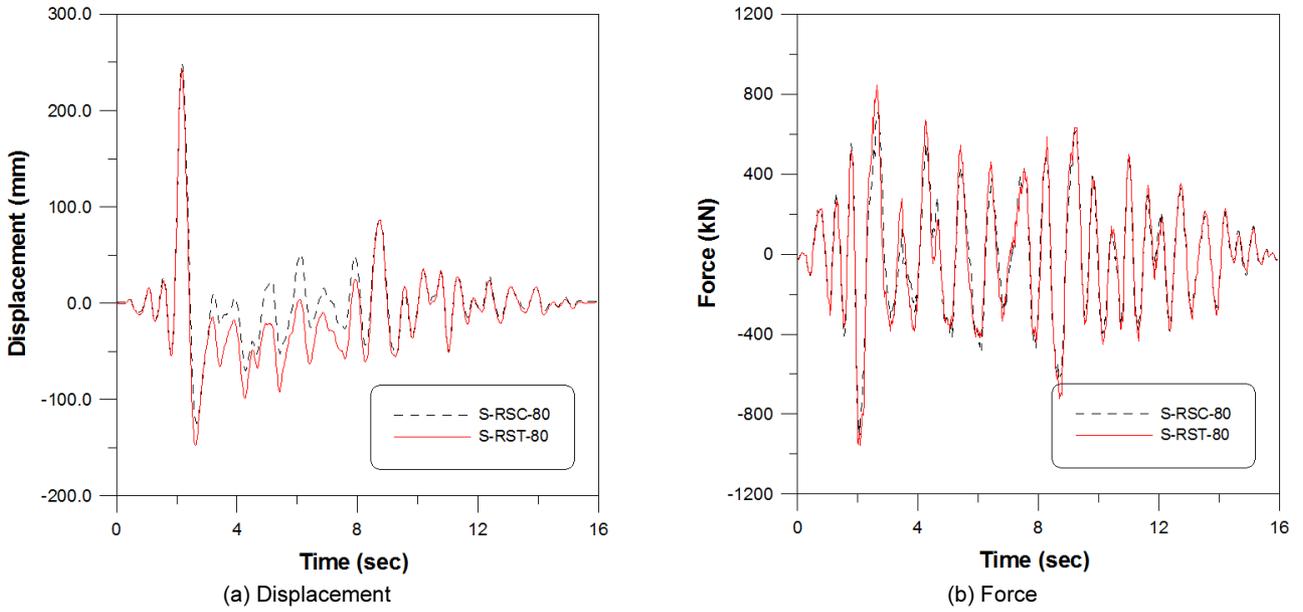


Fig. 11. Response for specimens (PGA 0.9 g)

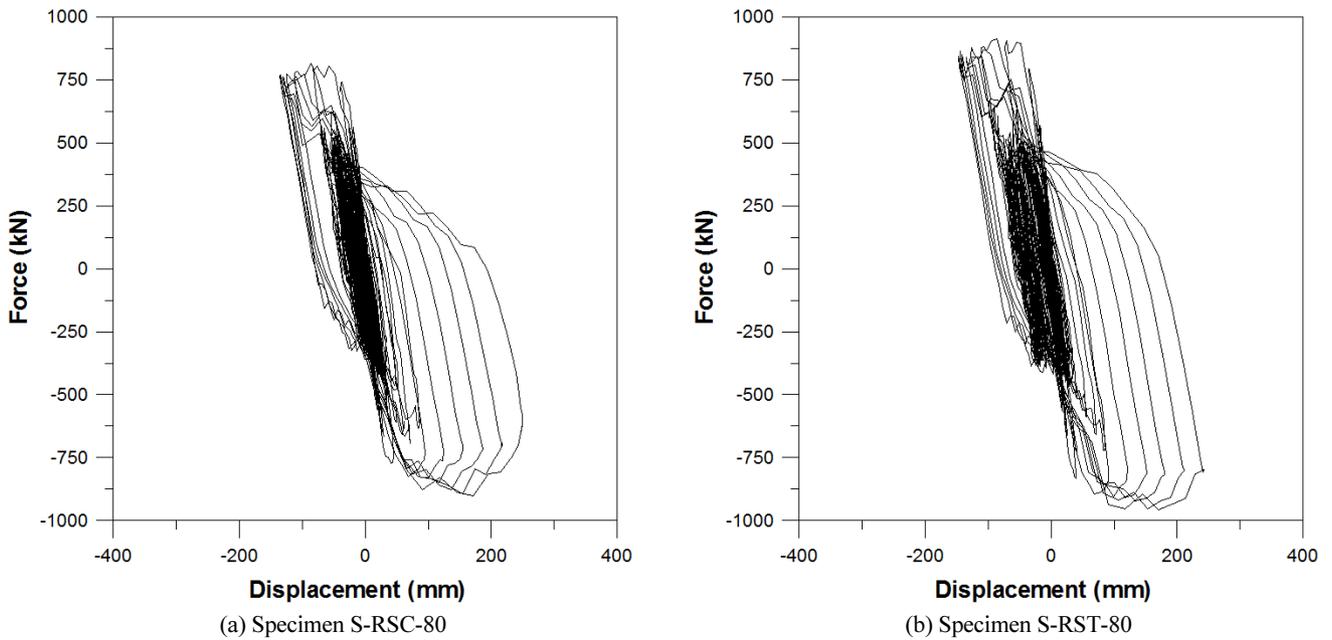


Fig. 12. Restoring force



Fig. 13. Links between performance level, damage state and engineering limit state [13]

**Table 3.** Failure criterion and damage indices [12]

Item		Failure Criterion ( $\epsilon_{cu}$ or $\epsilon_{tu}$ )	Damage Index (DI)
Concrete	Compressive and Shear	$0.004 + \frac{1.4\rho_s f_{yh} \epsilon_{sm}}{f'_{cc}}$	$1 - ftg_c \left( \frac{2\epsilon_{cu} - \epsilon_{cs}}{2\epsilon_{cu}} \right)^2$
Steel	Tensile	0.10	$1.20 \left( \frac{\epsilon_{ts}}{2ftg_r \epsilon_{tu}} \right)^{0.67}$

\* $\rho_s$  = transverse confining steel ratio;  $f_{yh}$  = yield stress of the confining steel  
 $\epsilon_{sm}$  = steel strain at maximum tensile stress;  $f'_{cc}$  = confined concrete compressive strength  
 $ftg_c$  = fatigue parameter for concrete;  $ftg_r$  = fatigue parameter for reinforcing bars  
 $\epsilon_{cs}$  = compressive strain in analysis step;  $\epsilon_{ts}$  = tensile strain in analysis step  
 $\epsilon_{cu}$  = ultimate strain of concrete;  $\epsilon_{tu}$  = ultimate strain of reinforcing bars

**Table 4.** Description of performance levels[13]

Performance level	Service	Repair	Damage	
			State	Index
Fully operational	Full service	Limited epoxy injection	Hairline cracks	0.1
Delayed operational	Limited service	Epoxy injection Concrete patching	Open cracks Concrete spalling	0.4
Stability	Not useable	Replacement of damage section	Bar buckling/Fracture Core crushing	0.75

**Table 5.** Comparative evaluation of progressive damage for specimens

Input Accel. (g)	S-RSC-80		S-RST-80		S-RSC-120		S-RST-120		S-RSC-240		S-RST-240	
	D.I.	P.L.	D.I.	P.L.	D.I.	P.L.	D.I.	P.L.	D.I.	P.L.	D.I.	P.L.
0.0627	0.01	●	0.01	●	0.02	●	0.01	●	0.02	●	0.02	●
0.0803	0.02	●	0.01	●	0.02	●	0.02	●	0.03	●	0.02	●
0.11	0.03	●	0.03	●	0.03	●	0.03	●	0.04	●	0.04	●
0.154	0.04	●	0.04	●	0.05	●	0.04	●	0.08	●	0.07	●
0.22	0.10	●	0.08	●	0.11	◎	0.09	●	0.13	◎	0.10	●
0.3	0.33	◎	0.26	◎	0.32	◎	0.24	◎	0.32	◎	0.27	◎
0.4	0.42	○	0.39	◎	0.44	○	0.41	○	0.42	○	0.38	◎
0.5	0.43	○	0.39	◎	0.44	○	0.43	○	0.43	○	0.40	◎
0.6	0.48	○	0.43	○	0.48	○	0.44	○	0.62	○	0.43	○
0.7	0.65	○	0.53	○	0.51	○	0.50	○	0.98		0.43	○
0.8	0.69	○	0.57	○	0.70	○	0.58	○	1.00		0.51	○
0.9	1.00		0.68	○	0.70	○	0.69	○	1.00		0.76	

(Note) Performance level: Fully operational - ●, Delayed operational - ◎, Stability - ○

이 비교하고 검토함으로써 중실 철근콘크리트 기둥실험체의 내진성능평가를 수행하였다.

입력지진파에 따른 요소레벨의 손상지수의 변화를 나타내는 Fig. 14는 이 실험의 변수로 사용한 개발된 삼각망 철근상세에 따른 기둥 실험체의 거동특성을 비교한 것이다. 입력지진파에 따른 손상지수 값을 확인해보면 0.11 g에서 S-RSC-80 실험체는 0.03, S-RST-80 실험체는 0.03이다. 0.3 g에서 S-RSC-80 실험체는 0.33, S-RST-80 실험체는 0.26이다. 0.6 g에서 S-RSC-80 실험체는 0.48, S-RST-80 실험체는 0.43이다. 그리고 0.9 g에서 S-RSC-80 실험체는 1.00, S-RST-80 실험체는 0.68이다. 즉 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 S-RST-80 실험체가 기존 철근상세를 갖는

S-RSC-80 실험체보다 동일한 입력지진파에서 손상이 지연되고 있음을 확인할 수 있다. 이는 손상의 주요 원인이 축방향 철근의 좌굴에 의한 것인데 삼각망 철근상세를 갖는 실험체는 삼각망 보강 횡철근에 의해 축방향 철근의 좌굴을 직접적으로 방지하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 15와 같이 기존 중실 철근콘크리트 기둥 실험체 및 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥 실험체 모두 유사한 손상진전을 보여주고 있으며 인공지진파에 대해 6가지 경우 모두 충분한 내진성능을 나타내고 있음을 확인 할 수 있다.

비선형 지진해석 결과의 입력지진파에 따른 손상지수 값을 확인해보면 0.11 g에서 S-RSC-80 실험체는 0.03, S-RST-80 실험체는 0.03, S-RSC-120

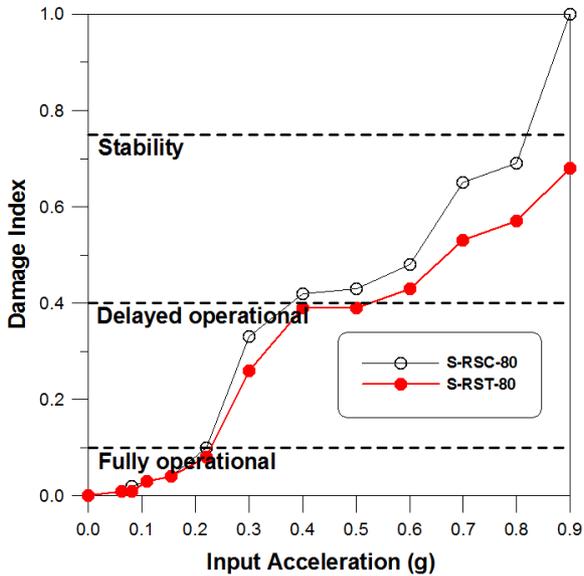


Fig. 14. Assessment of performance level for S-RSC-80 and S-RST-80

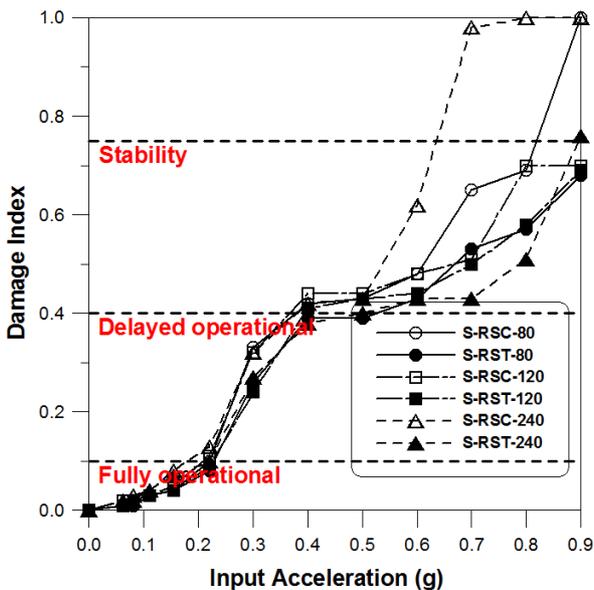


Fig. 15. Assessment of performance level for specimens

실험체는 0.03, S-RST-120 실험체는 0.03, S-RSC-240 실험체는 0.04, S-RST-240 실험체는 0.04이다. 0.3 g에서 S-RSC-80 실험체는 0.33, S-RST-80 실험체는 0.26, S-RSC-120 실험체는 0.32, S-RST-120 실험체는 0.24, S-RSC-240 실험체는 0.32, S-RST-240 실험체는 0.27이다. 그리고 0.6 g에서 S-RSC-80 실험체는 0.48, S-RST-80 실험체는 0.43, S-RSC-120 실험체는 0.48, S-RST-120 실험체는 0.44, S-RSC-240 실험체는 0.62, S-RST-240 실험체는 0.43이다.

이 해석결과에 나타난 손상지수의 값을 성능평가 기법으로 표현하면, 0.11 g에서는 완전기능 수준으로 손상이 거의 발생하지 않아 보수가 요구되지 않는 상태이다. 0.3 g에서는 기능수행 수준으로 경미한 손상이 발생하여 보수가 필요한 상태이다. 그리고 0.6 g에서는 붕괴방지 수준으로 심

각한 손상이 발생하여 부분 또는 전체적인 보수 및 보강이 필요한 상태를 의미한다.

위와 같이 이 연구에서 수정하여 제안하고 있는 손상지수에 의한 내진 성능평가 방법은 지진하중에 의한 삼각망 철근상세를 갖는 철근콘크리트 기둥의 비탄성 이력거동을 적절히 평가하고 있으며, 해석적 방법에 의한 기존 중실 철근콘크리트 기둥 및 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥의 내진성능평가가 가능할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

이 연구에서는 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥의 지진 거동과 내진성능평가를 위한 해석기법과 모델을 제시하였고, 준정적 실험으로 검증된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥 실험체의 진동대실험을 모사하기 위한 비선형 지진해석을 수행하였다. 비교-검토된 수치예로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 개발된 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥은 실험적, 해석적 연구 결과 설계된 값을 잘 반영하고 있으며 기존 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥과 비교하여 동등 이상의 소요성능을 갖고 있는 것으로 확인되었다.
- 2) 이 연구에서 제안한 해석기법과 모델은 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥 구조의 전반적인 거동특성을 바르게 표현하고 있으며 전반적으로 실험결과를 잘 추적하고 있음이 확인되었다. 이를 통해 향후 이러한 중실 기둥구조의 정밀해석이 가능할 것으로 판단된다.
- 3) 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥 시스템의 지진응답을 정확하게 예측하기 위하여 국내 근단층지반운동에 대한 모델링에서도 출된 지반운동중 근단층운동이 진행되는 방향에 직각인 경우의 비선형 지진해석을 수행하였다. 이때 지진하중의 지속시간 및 크기, 감쇠효과 등을 고려하였고, 이를 통해 동적 거동특성을 포함한 지진응답을 비교적 정확하게 예측함으로써 향후 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥 시스템의 내진성능평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 현행 내진설계 규정에 만족하지 않는 기존의 중실 철근콘크리트 기둥에 대한 보수·보강의 판단 등에도 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) 삼각망 철근상세를 갖는 중실 철근콘크리트 기둥의 성능평가를 위한 비선형 지진해석을 성능기반 내진설계개념에 접목하여 향후 합리적이고 경제성 있는 차세대 내진설계법의 개발 등에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

## / REFERENCES /

1. Kim TH, Lee JH, Shin HM. 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, 2014;18(1):1-8.
2. Kim TH, Kim HY, Lee JH, Shin HM. 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*, 2014;18(1):9–18.
3. Kim TH, Lee SH, Lee JH, Shin HM, Performance assessment of solid reinforced concrete columns with triangular reinforcement details, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 2016;28(1):75–84.
  4. Chung YS, Park CY, Hong HK, Park JH, Shim CS, Shake table response and analysis of RC bridge piers with lap-spliced steel under NFGM, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 2008;20(4): 451–458.
  5. Kim IH, Sun CH, Lee SH, Park KS, Seo HY, Seismic behavior of circular sectional RC bridge columns with various lap-splice lengths – an experimental study –, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2012;16(6):47–56.
  6. Phan VT, Near Fault (Near Field) Ground Motion Effects on Reinforced Concrete Bridge Columns, Thesis, University of Nevada, Reno, August, 2005.
  7. Kim JH, Kim JK, Modeling of near fault ground motion due to moderate magnitude earthquakes in stable continental regions, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2006;10(3): 101–111.
  8. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Highway Bridge Design Code (Limit State Design Method), c2015.
  9. Korea Concrete Institute, Concrete Structural Design Code, 2012.
  10. AASHTO, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th Edition, c2012.
  11. Kim TH, Lee KM, Yoon CY, Shin HM, Inelastic behavior and ductility capacity of reinforced concrete bridge piers under earthquake. I: Theory and formulation, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 2003;129(9):1199–1207.
  12. Kim TH, Lee KM, Chung YS, Shin HM, Seismic damage assessment of reinforced concrete bridge columns, *Engineering Structures*, 2005;27(4):576–592.
  13. Kim TH, Kim YJ, Kang HT, Shin HM, Performance assessment of reinforced concrete bridge columns using a damage index, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2007;34(7):843–855.
  14. Kim TH, Hong HK, Chung YS, Shin HM, Seismic performance assessment of reinforced concrete bridge columns with lap splices using shaking table tests, *Magazine of Concrete Research*, 2009; 61(9):705–719.
  15. Kim TH, Lee JH, Shin HM, Performance assessment of hollow reinforced concrete bridge columns with triangular reinforcement details, *Magazine of Concrete Research*, 2014;66(16):809–824.
  16. Taylor RL, FEAP – A Finite Element Analysis Program, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, c2000.
  17. Mander JB, Priestley MJN, Park R, Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 1988;114(8):1804–1826.
  18. Hilber HM, Hughes TJR, Taylor RL, Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1977;5:282–292.
  19. Hughes TJR, *The Finite Element Method*, Prentice-Hall, 1987.
  20. Applied Technology Council, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, ATC-40 Report, Redwood City, California, c1996.