

저층 RC 건물의 내진성능 보강에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Reinforcement of Low-Rise RC Structure for Seismic Performance

Dongbaek Kim^{a,1}, Byeonghoon Lee^{b,2}, Soondong Kwon^{c,3}, Induk Lee^{d,4}

^a *Dep. of Civil Engineering, Hnakeyong National University, 327 Jungangro, Anseong, Kyeonggi 17579, Republic of Korea*

^b *Dep. of Civil, Engineering, Hnakeyong National University, 327 Jungangro, Anseong, Kyeonggi 17579, Republic of Korea*

^c *Dep. of Civil, Engineering, Hnakeyong National University, 327 Jungangro, Anseong, Kyeonggi 17579, Republic of Korea*

^d *Dep. of Civil, Engineering, Hnakeyong National University, 327 Jungangro, Anseong, Kyeonggi 17579, Republic of Korea*

ABSTRACT

Nowaday, most of the low-rise concrete structures which have less than five stories were built before the intensified seismic code was established 2005. According to the fact that our country is not a safety zone ay more, studies are need to reinforce the seismic performance of that structures.

The basic frame of low-rise structure are consist of beams and columns with partition walls, therefore that are very weak about secondary wave of earthquake because of the high stiffness. The partition wall are consist of open channel for sunlight or ventilation and intermediate wall. The intermediate walls will enhance the stiffness of columns, but will cause shear failure with short column effects because of the reduced effective depth. But we don't have studies and adequate design code for partition wall effects, therefore some more studies are need for these facts.

KEYWORDS

low-rise structures
seismic code
partition wall
secondary wave
shear failure
effective depth

현재 우리나라에서 5층 이하로 건축된 저층 철근콘크리트 건물의 대부분은 2005년 국내건축구조물의 내진설계기준이 강화되기 이전에 설계 및 시공이 이루어졌음으로, 더 이상 지진의 안전지대가 아닌 것으로 인식된 우리나라도 이들에 대한 내진성능 보강방안에 대한 연구가 필요한 실정이다.

저층 구조물의 기본 골조는 대부분 보와 기둥에 칸막이 벽으로 이루어져 있으므로 강성이 커서 지진의 횡파에 매우 취약하다. 칸막이 벽은 채광 과 환기를 위한 개구부와 그 아래 허리벽으로 구성되어 있다. 허리벽은 기둥의 강성을 증가시키지만 유효길이를 감소시켜 단주효과를 유발시키며 지진발생 시 기둥의 전단파괴를 야기할 수 있다. 그러나 현재 국내에서는 칸막이 벽에 대한 연구가 많지 않고 적합한 설계기준도 없는 실정이므로 이에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

저층 구조물
내진설계 기준
칸막이 벽
횡파
전단파괴
유효 길이

© 2016 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

a Corresponding author. Tel. 82-10-2355-5143. Fax. 82-31-678-4674.

Email. dbkim@hknu.ac.kr

2 Tel. 82-10-5213-0280. Email. bhlee3789@naver.com

3 Tel. 82-10-5384-1020. Email. ksd1020@gmail.com

4 Tel. 82-10-2247-3470. Email. lid555@naver.com

ARTICLE HISTORY

Received May. 25, 2016

Revised Jun. 10, 2016

Accepted Jun. 23, 2016

1. 서론

최근 불의 고리(Ring of Fire) 근처의 국가나 한반도 주변의 중국이나 일본 등지에서 다수의 대규모 지진이 발생하고 있으며, 우리나라의 경우도 근래 진도 3 이상의 지진이 다수 관찰되고 있으므로, 건설교통부에서는 일정규모 이상의 건축물에 대하여 내진설계를 의무화하였다.(2005), 그러나 우리나라에서 저층으로 건축된 학교, 아파트, 단독주택, 연립주택 등의 철근콘크리트 건물의 대부분은 국내건축구조물의 내진설계기준이 강화되기 이전에 설계 및 시공이 이루어졌으므로, 이러한 구조물들에 대한 내진성능 보강방안에 대한 연구가 필요한 실정이다.

저층 콘크리트 구조물의 기본 골조는 대부분 보와 기둥에 칸막이 벽의 형태로 구성되어 있으므로 강성이 커서 지진의 횡파에 매우 취약하다. 칸막이 벽은 일부 또는 전부가 벽으로 구성되어 있는데, 골조의 대각선 버팀목처럼 작용하여 기둥에 인장력 또는 압축력을 유발하여 기둥의 강성을 증가시키고 유효길이를 감소시켜 지진발생 시 기둥의 전단파괴를 야기할 수 있다. 그러나 현재 국내에서는 칸막이 벽에 대한 연구가 많지 않고 적합한 설계기준도 없는 실정으므로 이에 대한 연구가 필요하다고 사료된다. 본 연구에서는 골조에 부분 칸막이 벽(허리벽)이 있는 저층 철근콘크리트 구조물에 섬유 슈트(Fiber Sheet)를 보강하여 수평하중에 대한 거동을 규명하고 칸막이 벽의 내진보강 효율성을 파악하고자 한다.

2. 최근 연구동향

칸막이 벽이 있는 RC 골조에 대한 최근의 연구에서, 무보강 콘크리트 칸막이 벽을 갖는 RC 프레임의 정적재하시험에서 휨파괴가 먼저 발생하지만 기둥만의 내력계산결과 전단파괴가 먼저 발생하는 것으로 나타나며, 프레임의 연성능력이 증가한 이유는 칸막이 벽이 전체구조물의 전단항복강도에 영향을 미치기 때문이라고 발표했으며 (최호, 2007), 내진설계되지 않은 기존 철근콘크리트골조 구조물의 내진성능 보강효과에 대한 연구에서는 와이어 브레이싱, 콘크리트벽돌 채움보강, 강제 X형 브레이싱, K형 브레이싱, 단부현치보강을 실시한 결과 실험체별로 각각 35%, 147%, 122%, 46%, 12%의 최대내력이 증대하였으며 기존 실험체보다 모든 보강시험체가 강성증대 효과와 보강효과가 나타났다고 했다. (정란, 2004) 또한, 프레임 내부에 횡변위를 구속하는 조건으로 칸막이 벽 보강을 하였을 때의 구조적 거동에 관한 연구를 통하여 내부 칸막이 벽이 철근콘크리트 프레임 구조물의 역할을 분담하여 에너지 소산과 하중저항에 있어 월등한 효과를 나타내고, 내부 칸막이 벽의 강도에 따라 에너지 소산력이 변화가 생긴다고 발표하였으며(Machael P. Schulle, 2000), 내부 칸막이 벽 3층 프레임구조의 거동에 관한 연구에서는 칸막이 벽의 종류에 따라 구조적 거동이 다르게 발생한다고 발표하였고, 칸막이 벽의 효과는 구조물의 동적 특성, 강도, 에너지 흡수, 파괴모드를 조정한다고 제시하였다.(P. Gavrilovic, 2008)

3. 저층 RC 구조물의 내진성능 향상방안 실험

저층 구조물의 구조형식은 대부분 철근콘크리트 또는 철근-철골콘크리트 골조이며, 골조내부 칸막이 벽은 같은 전체 채움벽과 부분 채움벽(허리 벽)으로 나눌 수 있다. 이러한 칸막이 벽을 브레이싱 요소(Bracing Element)를 이용하여 내진보강할 때에는 벽체를 해체한 후 보강을 실시하고 다시 칸막이 벽을 설치하는 과정이 필요하므로 시간과 비용이 많이 소요된다.

내진보강을 간단하게 하는 방법으로 섬유 슈트를 부착하는 방법은 내구성이 떨어지고 취성파괴를 유발할 수 있으므로 섬유 슈트를 함침하거나 섬유 스트립을 매립하는 방법이 보다 효과적이라 사료된다. 그러나 본 연구에서는 저층의 소형 RC 구조물을 대상으로 손쉽게 적용할 수 있는 경량의 아라미드 섬유 슈트(Fiber Sheet)와 섬유 스트립(Fiber Strip)을 부착하여 보강하는 방법에 대하여 실험을 수행하고 구조해석을 수행하여 그 결과를 검토하고자 한다.

3.1 시험체의 종류 및 물성치

실제 소규모 RC 구조물의 내진성능향상을 알아보기 위해 보강방법이 쉽고, 수평력이 작용할 때 비틀림의 영향이 거의 없는 부분 채움벽(허리벽)이 있는 골조를 기준 시험체로 선정하고, 무보강 시험체(SNF), 기둥보강 시험체(SCF), 기둥과 허리벽 보강 시험체

(SWF)로 구분하여 제작하였다. 시험체의 제원은 기둥의 단면 200mm×200mm, 유효길이 950mm, 상부 보의 총 높이는 250mm, 폭은 200mm, 순경간은 1400mm, 허리벽의 높이는 450mm, 하부 보의 총 높이는 350mm, 폭은 200mm, 순경간은 1400mm로 하였다.

콘크리트의 강도는 24MPa이며, 철근의 항복강도는 300MPa, 최대인장강도는 340MPa이다. 섬유 스트립의 물성은 두께 1.4mm, 폭 60mm, 단위폭당 단면적 84mm², 탄성계수 60Gpa, 인장강도 1500Mpa이며, 섬유 쉬트는 폭이 스트립의 2배이다.

3.2 실험계획 및 방법

보강재료의 접착은 우선 표면을 그라인딩하고 프라이머 도포를 수행하여 에폭시를 바른 후 섬유 스트립을 부착하고 양생을 실시하고, 시험체는 강제 Frame에 고정되게 설치하고, 시험체의 상부 보의 위치와 맞추어 Actuator를 설치하였다. 재하는 변위제어(Displacement Control)방식으로 수행했으며, 각 하중 단계의 값은 로드 셀(load cell)로 하중을 측정하였는데, 계획한 변위를 변위계(LVDT)로 측정하면서 각 변위에 따라 하중을 제어하였다. 재하는 기둥의 유효길이에 대한 수평변위비가 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5%가 되도록 하여 반복하중을 가하였다. 또한 계측은 시험체의 수평 변위를 측정하기 위하여 보 중앙부분에 LVDT를 설치하고, 기둥의 축 변위를 측정하기 위하여 와이어 LVDT 2개를 설치하였으며, 시험체의 미끄러짐(slip)은 시험체 하단에 LVDT를 설치하여 측정하였으며, 순수 수평변위는 측정된 수평변위에서 미끄러짐 변위를 차감한 값으로 하였다.(Fig. 1)

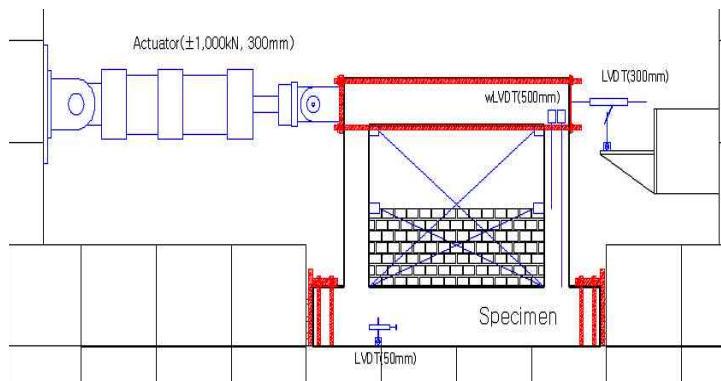


Fig. 1. The Schematic Diagram of Specimen Install

3.3 시험결과의 분석

모든 시험체의 횡변위는 프레임과 재하장치(Actuator) 사이의 재하지점 변위로 측정하였는데, 섬유 스트립을 보강하지 않은 시험체는 극한하중이 97.5kN 이었으며, 이후 급격한 하중의 감소가 일어나는데, 이는 칸막이벽에 의해 기둥에 단주효과가 발생한 것으로 판단되며, 단주효과가 발생하면 부재는 철근의 양과 상관없이 취성적인 파괴가 발생하는 것을 알 수 있다.

최초 균열이 발생한 하중, 항복점하중, 극한상태의 하중 등을 분석한 결과, 섬유 스트립을 보강한 실험체는 미보강 실험체에 비해 내력이 20% 정도 증가(약 120kN)하였음을 알 수 있는데, 이는 기둥과 칸막이 벽을 보강한 시험체는 칸막이벽과 프레임이 일체화 되므로, 최대하중이 기둥만 보강한 시험체보다 조금 더 증가한 것으로 사료된다. 그러나 초기균열과 항복하중은 비슷한 크기에서 발생하였는데, 이는 항복하중에 도달할 때까지는 기둥과 칸막이벽이 함께 거동하고 시험체에 균열이 발생한 후 칸막이벽과 기둥이 함께 거동하지 않게 되기 때문인 것으로 판단된다.(Table 1.)

Table 1. Test Data and Reinforcing Effect

| Specimen | Initial Crack | | Yielding Strength | | Ultimate Strength | | Ductility | |
|----------|---------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-----------|----------------|
| | load(kN) | Disp. mm | load(kN) | Disp. mm | load(kN) | Disp. mm | Ratio % | Relative Ratio |
| SNF | 48.50 | 3.27 | 80.70 | 9.8 | 97.50 | 16.7 | 1.70 | 1 |
| SCF | 52.20 | 3.89 | 102.40 | 6.9 | 118.70 | 27.2 | 3.94 | 2.32 |
| SWF | 49.60 | 4.01 | 102.90 | 7.6 | 122.20 | 23.9 | 3.14 | 1.85 |

또한, 보강하지 않은 시험체 및 섬유스트립으로 보강한 시험체 2개의 재하시험 결과를 하중 - 변위곡선으로 나타내면 Fig 2.와 같다.

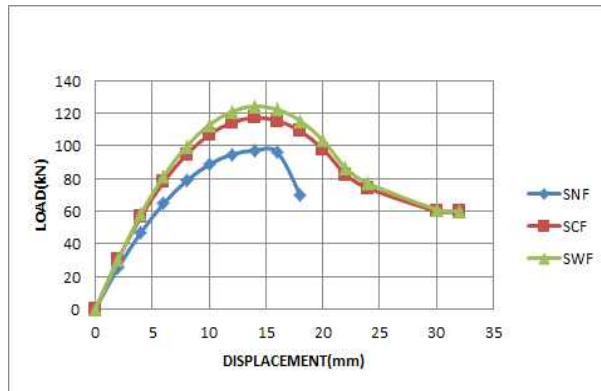


Fig. 2. Load - Displacement Diagram

3.3.1 시험체의 파괴양상

실험체의 파괴양상은 Fig 3.과 같다. SNF 실험체의 경우 양쪽 상부 기둥이 사인장 균열이 발생했으며, 칸막이벽 부분에는 줄눈을 따라 균열이 발생되었다. 기둥에서의 초기 균열은 재하가 계속됨에 따라 콘크리트 박리가 심화되며 파괴가 일어났다. SCF 실험체의 경우 섬유보강재로 보강하지 않은 기둥의 하부에서 균열이 발생하기 시작했으며, 기둥높이에 대한 수평변위 비 1%에서 보강재 끝부분의 탈락이 일어나기 시작했으며, 칸막이벽에 큰 균열이 발생하는 것이 관찰되었다. 2.5%에서는 좌측 기둥에 큰 균열이 발생하기 시작했으며, 3%에서는 콘크리트의 탈락이 심화되며 파괴가 두드러지게 나타났다. SWF 실험체의 경우 균열양상은 SCF 실험체의 경우와 약간 달랐으나 초기의 균열은 육안으로 관찰되지 않았다. 기둥의 하부에서 사인장 균열이 발생되었으며, 하중이 증가함에 좌측기둥에서는 기둥높이에 대한 수평변위 2% 근처에서 콘크리트가 박리되었고 섬유의 스트립이 늘어났으며, 3% 근처에서는 칸막이벽과 기둥사이에 균열이 발생하였다 (Fig 3.)

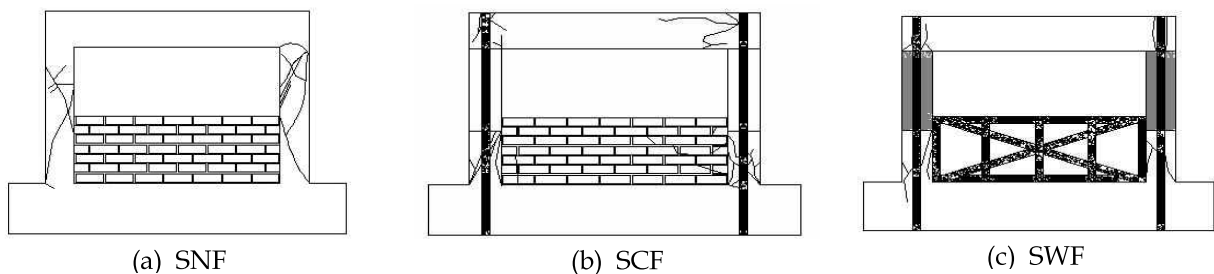


Fig. 3. Crack Propagation of Specimens

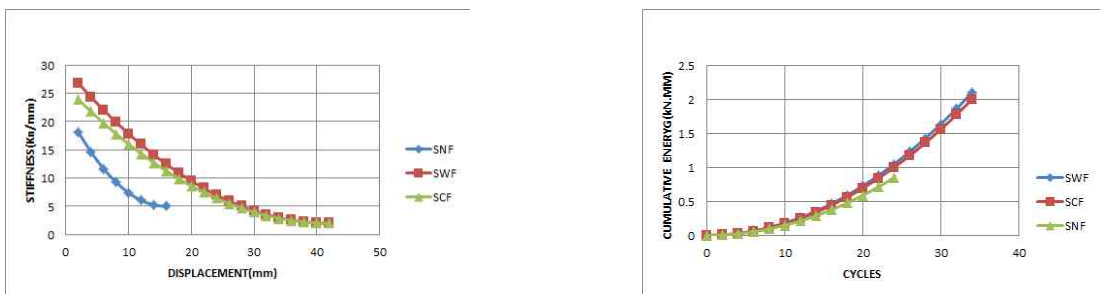
3.3.2 변위 연성도

변위 연성도(Displacement Ductility)는 구조형식, 기둥 길이, 기둥의 구속조건에 따른 구조물의 연성을 의미하며, 극한하중에서의 변위와 항복하중에서의 변위에 대한 비로 나타내는데. 항복하중 변위는 최대 수평하중을 연결한 선과 원점에서 최대 수평하중의 80%를 지나는 직선과의 교점에 대응하는 변위이며, 극한변위는 최대하중이 20% 감소되는 값에 대응하는 변위이다. 각 실험체 별 변위 연성도는 Table. 1와 같으며, 보강하지 않은 시험체에 비해 보강한 시험체들은 연성비가 1.85 ~ 2.32배 상승한 것을 확인 할 수 있다. 기둥과 칸막이벽을 동시에 보강한 경우는 일체화 거동으로 인하여 기둥만 보강했을 때보다 연성이 적게 증가하였지만, 기준 실험체보다 약 2.32배 연성이 증가한 것을 확인할 수 있었는데, 기둥만 보강한 실험체가 기둥과 칸막이벽을 동시에 보강한 실험체보다 연성이 좋게 나타난 이유는, 기둥을 보강한 실험체는 하중이 증가함에 따른 균열로 기둥과 칸막이벽이 따로 거동하게 되었기 때문이라고 사료된다 (Table 1.).

3.3.3 에너지 소산능력 및 강성도 변화

구조물이 파괴될 때까지 에너지를 흡수 또는 소산할 수 있는 능력은 내진성능을 평가하는데 중요한 요소 중 하나이며, 구조물의 지진응답해석에 의한 변위이력으로부터 실제로 흡수 및 소산되는 누적 소산 에너지(Cumulative Dissipated Energy)를 계산하고 총 에너지 량과 비교하여 구조물의 안전성 여부를 검토할 수 있다. 구조물이 한 Cycle동안 소산되는 에너지는 하중-변위 곡선의 내부면적으로 정의되는데, 미보강 실험체(SNF)의 경우는 파괴될 때의 에너지 소산 능력은 크지 않지만 보강된 실험체(SCF, SWF)가 최종파괴 될 때의 에너지 소산능력은 미보강 실험체의 약 3.4배 정도로 보강을 한 실험체 모두 미보강 실험체에 비하여 큰 에너지 소산 능력을 보였다. (Fig 4. (a))

또한, 각 시험체의 강성도는 변위가 증가할수록 저하되는데, 초기강성도는 보강한 시험체가 기준시험체 보다 약 1.2~1.4배 증가하였지만 초기강성도만 약간 증가하였을 뿐 변위가 증가 할수록 강성도는 거의 비슷하다. 여기서 강성도는 실험체의 단계별 하중을 그 때의 변위로 나눈 값으로 하였다.(Fig 4. (b))



(a) Dissipated Energy Progress (b)Stiffness Change Progress
 Fig. 4. Progress of Dissipated Energy and Stiffness Change

3.3.4 보강효율 계수 산정

내진성능을 결정하는 요소는 강도증가여부, 연성증가여부, 강성증가여부, 에너지 소산능력 증가여부, 보강공사를 수행하기 위한 비용, 공사기간 등을 복합적으로 고려한다. 강도계수를 S_{rf} , 연성도 계수를 D_{cf} , 에너지 소산능력 계수를 E_{cd} , 강성도 계수를 S_{if} , 보강비용에 대한 계수를 C_{of} 라 하면 보강효율 계수(R_{ef} , Reinforcing Efficiency Factor)라는 개념을 도입하면 $R_{ef} = (S_{rf} \times D_{cf} \times E_{cd} \times S_{if}) / C_{of}$ 로 표현할 수 있다. 각 계수는 미보강 실험체를 기준으로 하여 각 보강방법에 대한 계수를 산정 하였으며, 보강비용 계수는 본 시험에 소요된 각 보강방법의 금액 및 시간을 비교한 결과를 이용하였다. 이를 본 시험에 적용하여 보면 보강방법을 결정하는데 사용할 수 있는 보강효율은 기둥만 보강한 시험체가 8.59, 기둥과 끼움벽을 모두 보강한 실험체가 5.43으로 나타나 기둥만 보강하는 경우가 기둥과 끼움벽을 모두 보강한 경우보다 보강효율이 우수하게 나타났다(Table 3). 그러나 이러한 분석방법은 강도와 연성도, 에너지 소산능력, 강성도의 증진 등에 대한 보강효과를 정량적 분석(Quantitative Analysis) 산정한 것이므로, 실제 내진성능을 보강하기 위한 공사에 적용 시에는 강성도 및 강도, 연성도, 에너지 소산 능력에 대한 계수 중에서 파괴형태에 따라 보강효율 계수의 가중치를 조정하는 정성적 분석(Qualitative Analysis)도 함께 적용하여야 한다.

Table 3. Coefficients for Determine the Reinforcing Efficiency

| 변수 \ 보강방법 | SNF | SCF | SWF |
|---------------------|-----|-------|-------|
| 강도계수(S_f) | 1 | 1.21 | 1.24 |
| 연성도 계수(D_f) | 1 | 2.33 | 1.85 |
| 에너지 소산량(E_{cd}) | 1 | 3.40 | 3.50 |
| 강성도 계수(T_f) | 1 | 1.41 | 1.25 |
| 각 계수의 곱 | 1 | 13.52 | 10.04 |
| 보강비용계수(C_{of}) | 1 | 1.55 | 1.85 |
| 보강효율(R_{ef}) | 1 | 8.59 | 5.43 |

4. 결론

허리벽이 있는 RC 프레임의 기둥 및 허리벽을 섬유 쉬트(Fiber Sheet)로 보강한 후 수평하중에 대한 보강성능 시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 보강 시험체는 기준 실험체에 비해 최대 강도가 약 20% 증가되었으며 기둥만을 보강한 시험체와 기둥과 허리벽을 보강한 시험체는 유사한 강도증진 및 에너지 소산 양상을 보이므로 허리벽을 보강한 것은 효과가 거의 없는 것으로 나타났다.

(2) 기준 시험체의 경우 최대 하중 이후 급격히 강성도가 감소하였으나, 보강 시험체의 경우는 완만하게 감소하였고 연성변위비가 약 1.85~2.32배 증가하였다.

(3) 보강효율 면에서도 기둥과 허리벽을 보강한 시험체는 기둥만을 보강한 시험체에 비해 효율이 떨어지므로 저층의 RC 구조물은 기둥만 보강하는 편이 유리하다.

(4) 저층의 RC 구조물은 섬유 쉬트로 기둥만 보강하여도 연성도 및 강도증진으로 인하여 지진 시 대피시간을 어느 정도 확보할 수 있을 것이라고 사료된다.

References

- Jung Ran, Ryu Han Gook, Lee Sang Hyeon, "A Seismic Performance Evaluation of School Structures with Short Column Effect", Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. All rights reserved Autumn Conference, Vol. 12, No. 2, pp.55~60, 2008.
- Choi Ho, Jung Ran, "A Seismic Performance Evaluation of Kyeonggi Province School Structures concerned with Detailed Disaster Map", Korea Society of Safety all rights reserved, VI. 24, No. 4, pp.66~73, 2009
- Machael P. Schulle, Sinan Altin, M. Emin Kara, Mustafa Kaya, "An experimental study on strengthening of masonry infilled RC frames using diagonal CFRP strips", Composites Part B: engineering, Vol. 39, No.4, pp. 680~693, 2008.
- P. Gavrilovic, Sheilh, S.A. and Khoury, S.S. "A Performance -Based Approach for the Design of Confining in Tie Columns", ACI Structural Journal, pp.421-431, 1997.