

국내 소규모 건축물의 단주효과에 대한 내진성능검토

RC Short Column Effects on Seismic Performance of Small-Sized Buildings in Korea

김경태¹⁾ · 유창환¹⁾ · 박경훈¹⁾ · 김태진^{1)*}Kim, Kyungtae¹⁾ · Yoo, Chang-Hwan¹⁾ · Park, Kyunghoon¹⁾ · Kim, Taejin^{1)*}¹⁾(주)창민우구조컨설팅¹⁾Chang Minwoo Structural Consultants

/ A B S T R A C T /

This paper investigates seismic performance of a small-sized single story building in Korea. Nonlinear pushover analysis is performed to verify shear failure of RC short columns eventually led to performance degradation. Also, nonlinear time history analysis is performed using the same earthquakes from Gyeongju. Similar failure mode was obtained as in the report where a sudden rupture of the RC columns happened.

Key words: Seismic Performance, Nonlinear Analysis, Short Columns, Small-Sized Buildings

1. 서론

수평저항시스템 특히 전단을 크게 받는 단주의 경우 지진에 의한 피해가 국내외에서 보고되어왔다. 따라서 1990년대 이전부터 우리나라에서도 단주의 내력을 평가하는 실험과 해석 방법을 연구해왔다[1-4]. 특히 소규모 건물은 조적벽과 같은 비내력벽이 적용된 RC골조의 상부, 즉 단주의 취성 파괴에 대해 매우 취약한 것으로 밝혀졌다[5], [6], [16]. 뿐만 아니라 이번 경주지진의 피해사례에서도 이런 조적벽체가 붙어있는 기둥에 취성파괴가 발생함을 확인할 수 있었다. 우리나라 건물들 중에도 단주가 많이 적용된 경우를 찾아볼 수 있는데 대표적인 예로 조적벽이 붙어있는 단주, 슬라브 단차에 위치하는 단주, 그리고 RC 벽체위의 단주가 있다.

문제는 우리나라의 약82%이상을 차지하는 연면적 1000m² 미만 3층 미만을 가진 건축물들이 내진설계에 대한 구조기술사의 검토 없이 지어져 왔다는 사실이다. 전문가가 내진설계의 검토를 할 수 없는 현 상황을 보완하고자 소규모건축물의 구조설계 현황을 검토하고 이를 보완하기 위한 내진보강지침안의 필요성을 제시한 바 있지만 [7-10] 아직 구체적인 가이드라인

이 확립되지 않아 단주 파괴에 의한 소규모 건축물의 지진피해 위험은 여전히 남아 있는 상태이다. 따라서 본 연구에서는 구조기술사 검토 의무대상에서 제외된 소규모 건축물 중 특히 취성파괴의 거동을 보이는 철근콘크리트 단주가 포함된 건물들의 내진성능을 살펴보고 가능한 구조적 보강방안에 대해 살펴보고자 한다.

2. 대상 건축물의 개요

대상 건축물은 국내에서 쉽게 찾아볼 수 있는 1층 규모의 음식점으로 선정하였다(Fig. 1). 건축물의 층고는 4.5 m이며 면적은 약 161.8 m² 이므로 이 건축물은 구조안전 확인대상 건축물이 아니다. 건물의 용도 특성상 화장실, 주방 등의 시설로 인해 골조주변에 철근콘크리트 벽체나 조적벽체가 위치하는 경우가 발생한다. 철근콘크리트 보와 기둥은 KBC2016 기준에 따라 보통모멘트 골조로 설계되었으며 지진하중을 산정하기 위한 반응수정 계수는 3을 사용하였다. 콘크리트의 강도는 $F_{ck} = 21 \text{ MPa}$, 철근의 항복강도는 $F_y = 400 \text{ MPa}$ 을 사용하였다(Table 1). 배근의 타입은 C1은 12-D22, 그리고 C2는 8-D22로 선정하였다.

*Corresponding author: Kim, Taejin

E-mail: taejin@minwoo21.com

(Received November 21, 2016; Revised December 5, 2016; Accepted December 8, 2016)

Table 1. Summary of beam/column design

| Members | h (mm) | b (mm) | d (mm) | s (mm) | Vs (kN) | Vc (kN) | $\phi V_{n,grav}$ (kN) |
|---------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|------------------------|
| C1 | 450 | 450 | 360 | 300 | 68 | 124 | 144 |
| C2 | 400 | 400 | 320 | 300 | 61 | 97 | 118 |
| G1 | 500 | 300 | 400 | 150 | 211 | 127 | 254 |
| G2 | 500 | 300 | 400 | 200 | 166 | 133 | 224 |
| G3 | 500 | 200 | 400 | 200 | 166 | 89 | 191 |

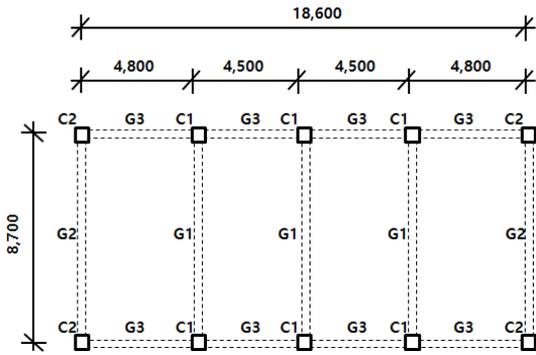


Fig. 1. Building's floor plan (RC structure)

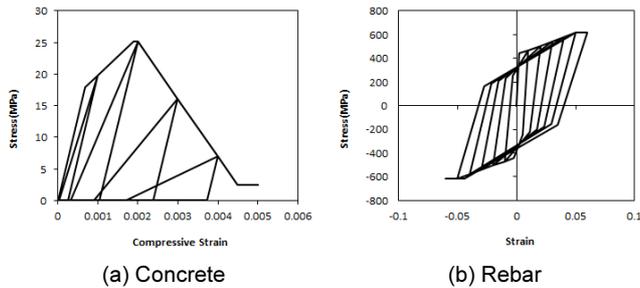


Fig. 2. Constitutive Models

3. 해석 모델

지진에 대한 실제 거동을 평가하기 위해 상용 프로그램인 MIDAS GEN과 Perform 3D를 사용하여 비선형 정적 및 동적해석을 수행하였다. 재료의 비선형 속성은 콘크리트 및 철근의 응력과 변형률 (σ - ϵ)의 관계로 정의하고 콘크리트의 경우, 인장 효과가 미비하다고 가정하여 수정 Kent-Park 모델을 참고하였다[20]. 그리고 반복하중을 받는 콘크리트의 강성 감소를 구현하기 위해 연화손상(softening damage)을 반영한 선행 연구자료를 참고하여 응력과 변형률의 관계식을 입력하였다(Fig. 2) [11, 12]. 철근의 경우도 이력곡선에 나타난 응력 변형률의 관계를 사용하였다. 보와 기둥에는 FEMA hinge 모델을 사용하였고 힌지는 부재의 양단에 위치하는 것으로 가정하였다[19]. 벽체단면은 섬유요소 (fiber element)를 사용하여 벽체 단부의 콘크리트 파괴로 인한 강성 저감이 발생하도록 모델링하였다.

콘크리트의 재료 탄성계수는 KCI 2012의 탄성계수 계산식을 참고하였고, 철근의 물성치는 콘크리트와 마찬가지로 기대강도계수를 적용하여 삼각형 곡선으로 입력하였다. 철근의 파단 변형률은 0.1을 사용하였다[18].

보 부재의 비선형 모델링 변수 및 허용기준은 ASCE41-13을 참고하였다 [17]. 연결보의 단부에서 최대로 가능한 모멘트로부터 산정한 소요전단강도와 공칭전단강도의 비를 통해 보의 휨지배 또는 전단지배를 결정하였다. 슬래브의 경우 슬래브요소를 모델링하지 않고 Rigid Diaphragm으로 가정하여 진행하였다.

지붕층의 고정하중은 5.25 kN/m^2 이며 활하중은 3 kN/m^2 을 사용하였으며 초기 중력하중에 대한 조합은 1.2DL+1.6LL을 적용하였다.

4. 내진 성능 검토

4.1 현행 기준에 따른 내진설계 검토

건물의 DCR 분포를 보면(Fig. 3) 보에 작용하는 모멘트의 경우 중력하중에 비해 Sd지반에서의 단부 모멘트의 DCR이 최대2배 이상 증가하게 되어 배근량 또는 단면 증가가 필요하다. 기둥에서 발생하는 축력의 경우 중력이나 지진하중이 가해졌을 때의 하중차이는 크지 않지만 모멘트 및 전단력에서 지진하중이 지배하기 때문에 이 지진하중에 대한 설계가 필요하다고 판단된다. 내진설계를 기준대로 수행한다고 했을 때 특히 모멘트의 경우 40%이상의 DCR 차이로 인해 배근 및 단면의 증가가 필요할 수 있다.

또한 P-M 상관도에서 볼 수 있듯 중력하중의 축력과 모멘트의 위치가 설계강도 P-M곡선 안에 위치하기 때문에 내력을 만족시키고 있지만 C2 기

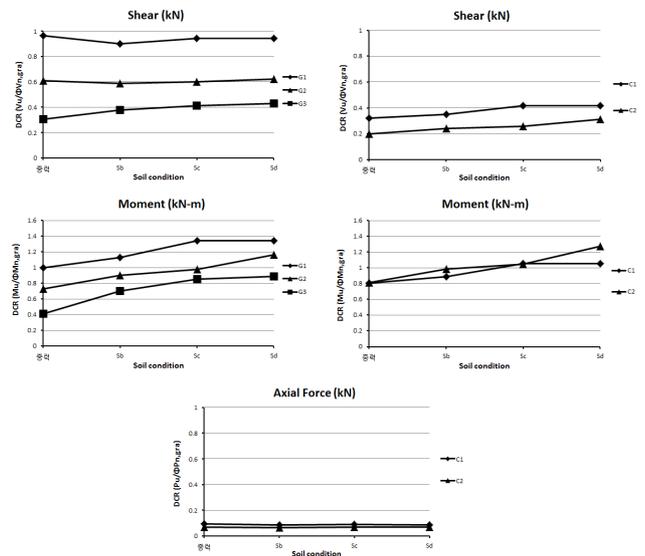


Fig. 3. Demand and capacity ratio of beams and columns

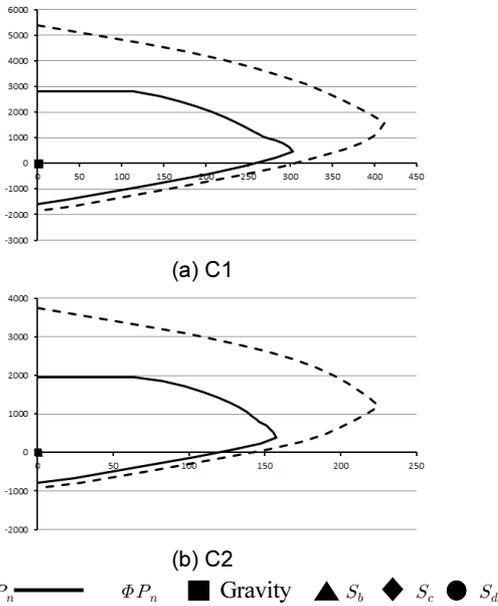


Fig. 4. P-M curves of columns

등과 같은 모서리 기둥의 경우에는 축력이 타기둥에 비해 작고 모멘트에 대한 영향이 크다(Fig. 4). 따라서 현행 기준으로 올바르게 내진설계를 수행했을 경우, 1층의 모멘트골조로만 이루어진 건물은 횡력을 기둥 및 보에서 저항하도록 설계 되어야하기 때문에 중력에 의한 설계보다 단면 및 배근이 증가하게 된다.

4.2 내진성능평가

만약 예제건물과 같은 소규모 1층 건물이 구조기술사의 검토 없이 설계가 되었다고 가정해보자. 설계자의 실수로 중력하중에 대해서만 부재가 설계가 되었다고 가정하고 예제건물의 내진성능을 비선형해석을 수행한 뒤 그 결과를 분석하였다.

푸시오버해석에서 건물의 성능곡선을 추출하고 이를 요구 스펙트럼과 비교하는 방법을 사용하였다(Fig. 5). 이 때 부재의 최대강도를 파악하고 이를 요구수준과 비교하였다. 비선형 정적푸시오버해석은 한국시설안전공단 의 요령에 따라 각 구조부재의 소성현저 모델링을 위한 강도 강성 및 변형 능력을 사용하였다. 성능평가에서는 지배적인 거동의 종류에 따라 공칭 또는 평균 강도를 사용하나, 여기서는 소규모 건축물 시공의 불확실성을 감안하여 모든 경우에 공칭강도를 사용하였다. 모든 구조부재는 비내진상세로 규정하여 변형 능력은 최소한의 크기로 반영되도록 하였다. 또 각 구조부재의 변형 능력은 선형연구와 시설연구공단에서 제시한 푸시오버 해석 절차를 따랐다[13,14].

해석 결과, 골조의 성능은 X, Y방향 모두 탄성구간에서 성능점이 위치하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 6). 설계 시에는 설계 횡력이 가해짐으로써 기둥 및 보의 배근이 증가해야하는 경향이 있었지만 설계 및 재료 등의 초과강도로 인해 비선형해석에서는 성능이 좋게 나타났다. 이러한 결과는 건축구조기준이 충분히 보수적이기 때문에 나타난 운이 좋은 결과로 보인다.

KBC2016 기준에 따르면 골조의 반응수정계수는 3이므로 Sd 지반의 경우 설계스펙트럼의 수준은 대략 0.15 g가 된다. 1층 건물의 성능곡선은 최

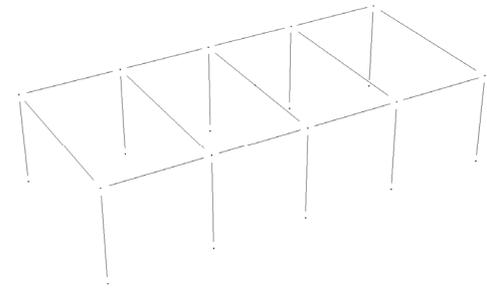


Fig. 5. 3D model of the building

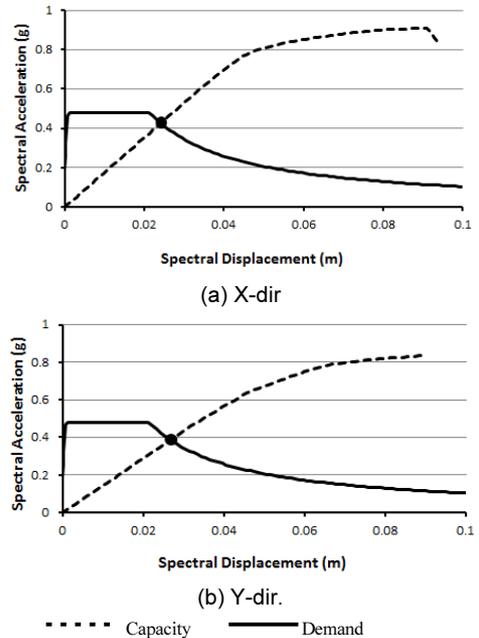


Fig. 6. Capacity curve and performance point of the building

대 가속도가 각 방향별 약 0.8~0.9 g 로 설계스펙트럼의 약 5~6배 정도이므로 이미 충분한 초과강도를 확보한 것으로 판단할 수 있다. 예제와 같은 규모의 1층 건물의 경우 KBC 2016을 따라 중력하중에 대해서만 설계를 진행하여도 실제 내진성능에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

4.3 단주 영향성 평가

국내에서는 단주가 적용된 우리나라 1층 건물의 대표적인 3가지 경우를 고려하였다. 이를 조적벽 위의 단주(Type 1), 슬래브 단차에 위치한 단주(Type 2), 그리고 RC벽체 위에 있는 단주(Type 3) 로 분류하였다.

4.3.1 조적벽

건물은 골조만 있는 건물에 조적이 있을 경우를 추가한 형태이다. 조적벽체의 경우 한면 전체를 조적벽으로 채우기보다 상부 쪽은 창문으로 뚫어 놓은 경우가 대부분이다. 이에 따라 조적벽체의 양 옆에 위치한 기둥의 경우 단주가 된다. 일반적으로 조적벽체는 하중으로 치환하고 모델링은 하지 않기 때문에 단주에 대한 내진성능을 파악하기 힘들다. 따라서 본 연구에서는

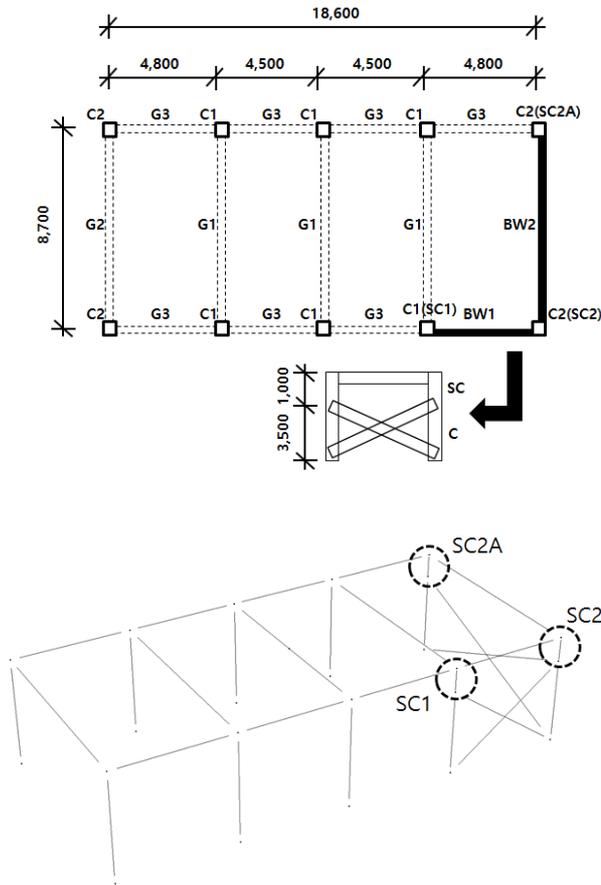


Fig. 7. Short columns above masonry walls (Type 1)

Table 2. Design shear strength of short column

| Type | Members | Vs (kN) | Vc (kN) | $\phi Vn, grav$ (kN) |
|-------|-----------------|---------|---------|----------------------|
| Type1 | SC1 | 68 | 124 | 144 |
| | SC2, SC2A | 61 | 97 | 118 |
| Type2 | SC1A, SC1B | 68 | 124 | 144 |
| Type3 | SC1, SC1A, SC1B | 68 | 124 | 144 |
| | SC2, SC2A | 61 | 97 | 118 |

조적벽체를 한국시설안전공단 지침에 따라 등가압축가새로 치환한 후 단주에 대한 내진성능을 평가하였다(Fig. 7). 이때 내진성능을 평가하는 방법으로는 비선형 정적해석 방법을 사용하였다. 상부 단주는 SC로 표현하였으며 아래의 장주는 C로 표현하였다.

단주를 평가하는데 가장 중요시되는 부분은 전단파괴의 발생 여부이다. Fig. 10은 단주의 성능곡선 (Capacity Curve)으로 해당부재의 전단성능, 성능점, 설계전단강도를 나타낸 그래프이다. 각 단주에 대한 설계전단강도 KBC2016에 따라 산정하였으며 Table 2에 나타내었다. X방향에 대한 결과의 경우 성능점에서의 전단력이 설계전단강도를 초과하지 않는다. X방향으로 단주에서 전단파괴가 발생하지 않는 이유는 X방향으로 횡력 저항하는 기둥요소들이 많기 때문에 상대적으로 단주에 전단력이 적게 발생하는 것으로 판단된다. 하지만 Y방향의 경우는 횡력 저항하는 기둥의 개수가 X방향에 비해 작다. 따라서 SC2A 단주기둥의 전단력이 X방향에 작용하

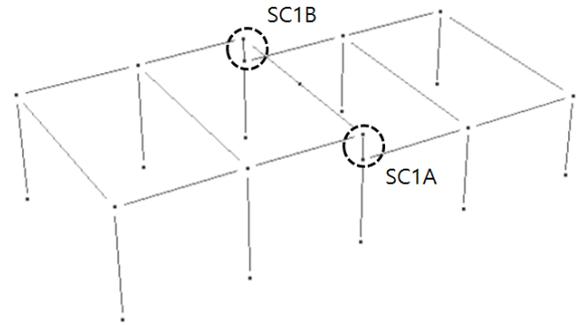


Fig. 8. Short columns between the slab gap (Type 2)

는 기둥에 비해 크기 때문에 SC2A 단주 기둥에서 전단 성능을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 실제 소규모 건물 설계에서는 모델링 되지 않고 시공되는 부분이기 때문에 대다수의 소규모 건물에서 이러한 단주 전단파괴가 발생할 것으로 예상되기 때문에 이에 대한 보강이 필요하다고 판단된다.

4.3.2 슬래브 단차

Fig. 8은 지붕층의 슬래브 레벨 차이로 인해 단차가 발생하는 건물이다. 슬래브 단차로 인해 기둥에서 단주가 된다. 실제 건물 설계 시 슬래브 레벨 차이는 일반적으로 동일레벨로 설계를 하기 때문에 단주에 대한 내진성능을 정확히 파악하지 않았을 가능성이 매우 크다. 따라서 이에 대한 내진성능을 정확히 검토할 필요가 있다. 단주의 경우 길이가 짧기 때문에 휨에 대한 파괴보다는 전단에 의해 파괴가 된다. 본 연구에서는 전단성능의 경우 X, Y 모든 방향에 대해서 평가하였다. 평가 결과(Fig. 11)에서도 나타나듯이 모든 방향에 대해서 전단성능을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 이때 Y방향의 경우 횡력이 작용하기 전 중력하중만 작용했을 때 이미 전단력이 설계 전단강도를 초과하는 것으로 나타났다. 이러한 현상이 나타나는 이유는 중간층의 슬래브가 일으키는 기둥의 횡변위구속효과로 인해 모멘트가 재분배가 발생하게 되고 단주에 설계전단강도 이상의 전단력이 과도하게 집중되기 때문이라고 판단된다.

4.3.3 RC벽체

Fig. 9는 골조만 있는 건물에 RC벽체를 추가한 모델이다. 이때 RC벽체는 “소규모 건축물 구조설계 기준 및 해설안” [15]에 따라 벽체를 추가하였으며 벽체에 대한 정보도 위의 참고문헌에 따라 모델링하였다. 실제 건물 설계 시 벽체에 오프닝이 발생할 경우 위의 모델과 같이 기둥에서 단주가 발생할 수 있다. 따라서 위와 같은 단주에 대한 내진성능을 검토할 필요가 있다. 단주에 대해서는 슬래브 단차모델과 같이 전단성능에 대해서만 평가하였다.

Fig. 12에서 전단성능의 결과를 보면 SC1과 SC1A는 X방향의 결과이다. 이때 성능점에서의 전단력이 전단강도를 초과하지 않는 것으로 나타나 전단성능을 만족하는 것으로 판단된다. 하지만 Y방향의 결과인 SC2A를 보면 성능점에서의 전단력이 전단강도를 초과하여 전단성능을 만족하지 못하는 것으로 나타나는데 이러한 현상이 나타나는 이유는 위의 골조모델에서 조적벽이 있는 현상과 마찬가지로 X방향으로는 횡력에 저항하는 기

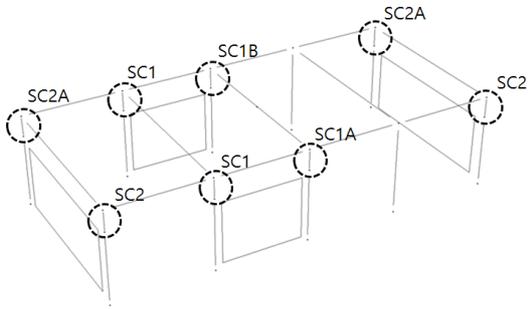


Fig. 9. Short columns at RC shear walls (Type 3)

등요소들이 상대적으로 Y방향에 비해 많기 때문에 여러 기둥들에서 전단력을 부담하고 있지만 Y방향의 경우 횡력을 부담하는 기둥의 수가 X방향에 비해 적기 때문에 상대적으로 단주에 전단력이 많이 발생하게 된다. 따라서 X방향에 비해 Y방향의 기둥 전단성능이 더 좋지 않게 나타나는 결과를 확인하였다.

4.3.4 비선형 동적해석

동적하중 입력 시 실제 경주지진에서 발생한 피해사레 지역의(Fig. 13).

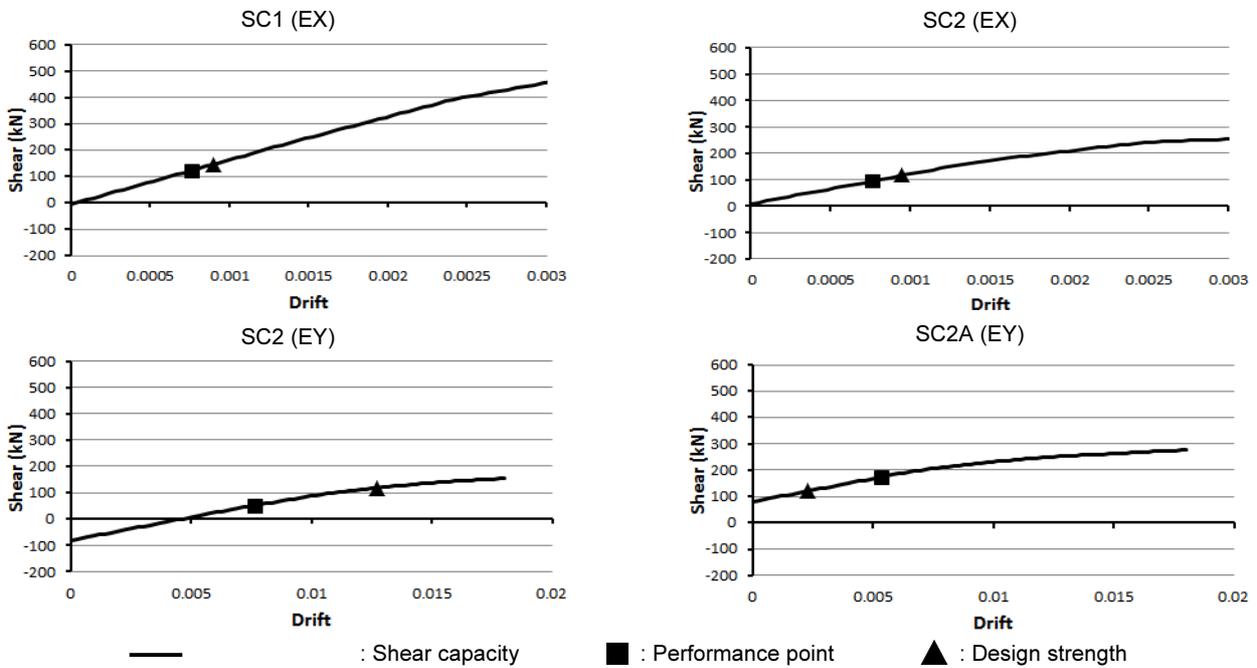


Fig. 10. Capacity curve and performance point of the building (Type 1)

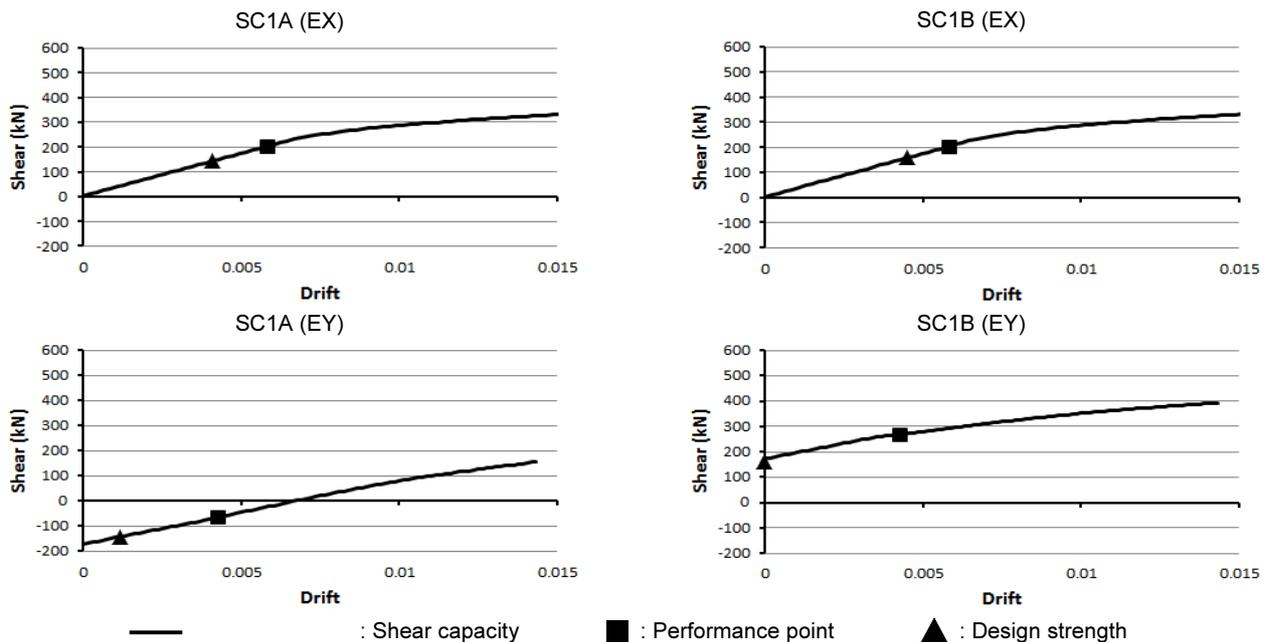


Fig. 11. Capacity curve and performance point of the building (Type 2)

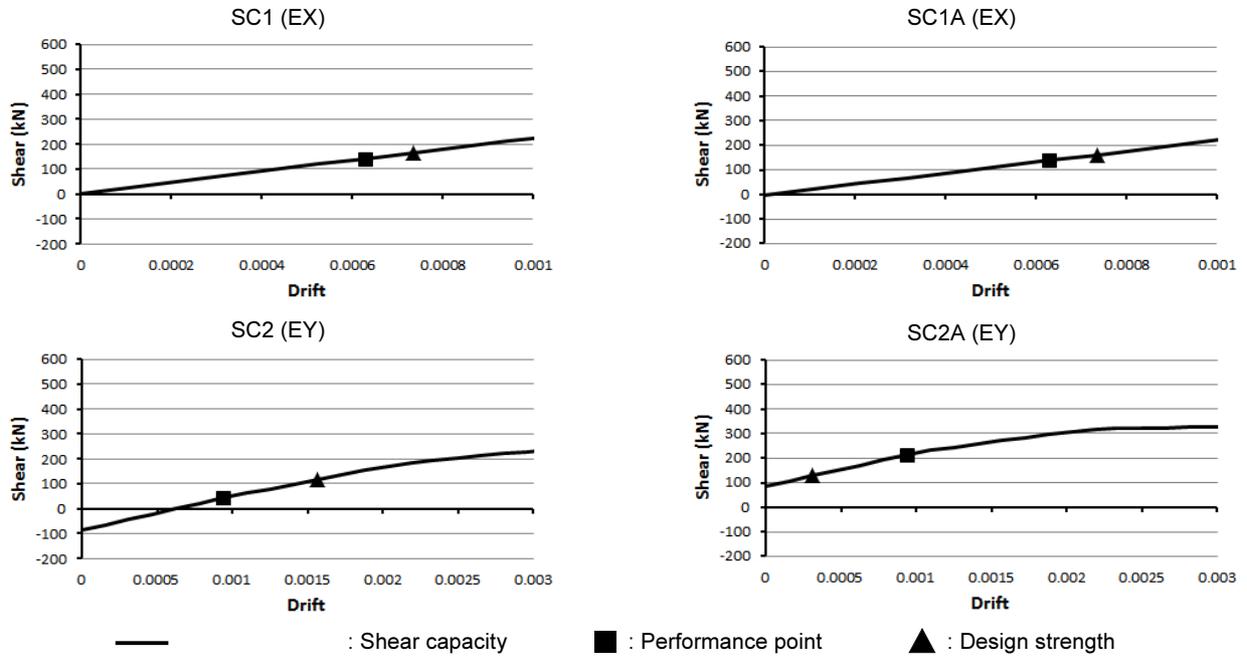


Fig. 12. Capacity curve and performance point of the building (Type 3)



Fig. 13. Short column shear failures during Gyeong-ju earthquakes (2016)

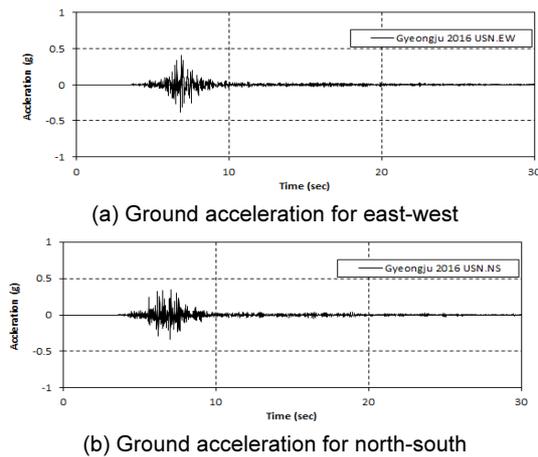


Fig. 14. Record of Gyeong-ju Earthquakes (2016)

지진파를 사용하였으며 USN에서 계측된 계측지진파를 사용하였다(Fig. 14) 해석에서는 수평방향 성분만을 이용하였으며 east 성분을 X방향, north 성분을 Y방향에 적용하여 해석을 진행하였다.

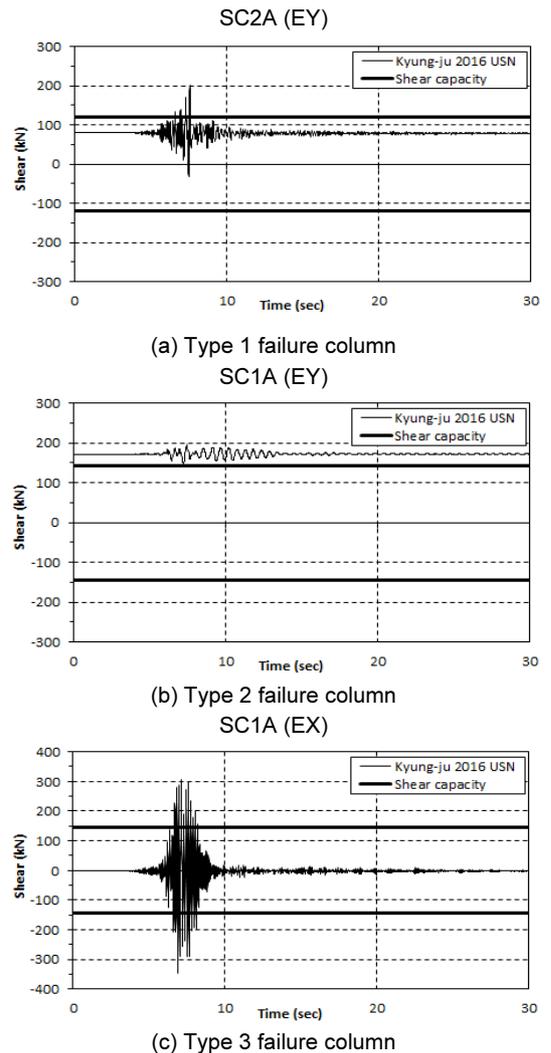


Fig. 15. Time history analysis results and failed columns

조적벽의 경우 모든 단주들에 대해 전단성능을 검토한 결과 모두 피크에서 전단강도를 초과하여 성능을 만족하지 못하는 것으로 나타났다(Fig. 15(a)). 비선형 정적해석 결과와는 달리 X방향의 짧은 기둥인 SC1과 SC2의 X방향 결과에서도 전단성능을 만족하지 못하였다.

슬래브 단차의 경우도 모든 단주에서 전단성능을 만족하지 못하는 것으로 나타난다(Fig. 15(b)). 특히 Y방향에 대한 해석결과는 초기 중력하중 작용 시에도 전단성능을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 비선형 정적해석결과와 동일하게 나타났다. RC 벽체 단주 모델에서도 모든 단주들은 설계 전단강도를 초과하고 있다(Fig. 15(c)). 이러한 현상은 벽체 강성에 의한 하중 쏠림현상의 결과로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 단주를 가지는 국내 소규모 단층 건물의 내진성능을 해석적으로 평가하고 이들 건물에 존재하는 단주가 내진성능에 미치는 영향을 검토하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 모멘트 골조만 존재하는 일반 단층 건물의 경우, 푸시오버해석의 성능 점이 탄성범위에 있는 것을 확인하였다. 예제와 유사한 형태의 단층 건물의 경우, 중력하중에 대해서만 설계하여도 건물이 이미 충분한 내진 성능을 확보하는 것으로 판단된다.
- 2) 하지만 단주가 생기게 될 경우 건물의 성능이 훨씬 저하될 가능성이 존재한다. 비선형정적해석결과를 보면 실제 성능점에서 단주에 발생하는 전단력이 설계 강도를 훨씬 넘어서는 것을 확인하였다. 구속효과로 인해 모멘트의 재분배가 발생하고 전단력이 과도하게 집중되어 기둥의 상하부에 전단력이 크게 발생하기 때문이라고 판단된다.
- 3) 이번 경우 지진에서 기록된 지진파를 가지고 비선형동적해석을 수행한 결과 예상대로 단주에서의 전단 파괴가 우선 발생하였고 경우 지진피해 현장에서도 비슷한 파괴 형상이 발견되었다. 추후 유사한 지진이 발생할 경우에 대비해서 기존 건물에 단주에 대한 보강이 필요하다고 판단된다.
- 4) 단주의 전단보강 종류에는 기둥의 구속을 완화하는 방법, 증타공법, 탄소섬유보강, 추가 내력벽 설치 등이 있다. 추후 이들 방법이 실제 건물에 미치는 영향에 대한 별도연구가 필요할 것으로 판단된다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 국토교통부 도시건축 연구개발사업의 연구비 지원(과제번호 16AUDP-B066083-04)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

/ REFERENCES /

1. Han D, Kim P. The influence of hoop bar on the compressive strength of short steel reinforced concrete columns, J. of the Arch. Inst. of Korea, 1992;1(12):335-338.
2. Kim K, et al. Evaluation of R/C short columns strength by concrete compressive strength and transverse reinforcement ratio, Conference

presentation in Arch. Inst. of Korea, c1999.

3. Min KM, Kim YI, Lee KS. Structural behavior of reinforced concrete short columns by pseudo-dynamic test, J. of the Arch. Inst. of Korea, c2008.
4. Oh JS, Kang DE, Yi WH. A study on the evaluation of shear strength of the RC short column, J. of the Arch. Inst. of Korea, 2007;1(27):219-222.
5. Moon KH, Lee CS, Han SW. Development of analysis model for masonry concrete structure, Conference presentation in Arch. Inst. of Korea, c2013.
6. Guevara LT, Garcia LE. The captive - and short-column effects, Earthquake Spectra, 2005;21(1):141-160.
7. Kim TW, Eom TS, Kim CG. A study on the seismic behavior of small sized reinforced concrete buildings in Korea, Earthquake Engineering Society of Korea, 2014 Jul;18(4):171-180.
8. Ryu EM, Lee YK, Shin YS. Statistical analysis for structural design condition of domestic small sized buildings through design documents, Conference presentation in Arch. Inst. of Korea, c2014.
9. Ryu EM, Kim GY, Shin YS. Risk analysis of domestic small sized buildings through design documents, Conference presentation in Arch. Inst. of Korea, c2015.
10. Shin YS, Ryu EM, Lee YK. Structural safety of small sized buildings in South Korea, Conference presentation in Arch. Inst. of Korea, c2015.
11. Gorgulu O, Taskin B. Numerical simulation of RC infill walls under cyclic loading and calibration with widely used hysteretic models and experiments, Bull earthquake Egn, c2015.
12. Ghodsi T, Ruiz JAF. Pacific Earthquake Engineering Research/ Seismic safety commission tall building design case study 2, Struct. Design Tall Bdg. 2010;19:197-256.
13. Kim TW, Min CG. Analytical study of the effect of full and partial masonry infills on the seismic performance of school buildings, Earthquake Engineering Society of Korea, 2013 Sep; 17(5): 197-207.
14. KISC. Guidelines for seismic performance evaluation and rehabilitation of existing buildings, Kyeonggi-do, Korea, Korea Infrastructure Safety Corporation; c2013, p.120.
15. KSEA. Structural design criteria and commentary for one and two story small buildings, Seoul, Korea; Korean Structural Engineers Association, c2012, p.69.
16. Oh JS, Kang DE, Yi WH. A study on the evaluation of shear strength of the RC short column, J. of the Arch. Inst. of Korea, 2007;1(27): 219-222.
17. ASCE41, Seismic rehabilitation of existing buildings, Reston, VA: American Society of Civil Engineers; c2006.
18. Architectural Institute of Korea, Korean Building Code 2016, Korean building code - structural, Seoul, Korea, c2016.
19. FEMA356, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, Washington D. C.: Federal Emergency Management Agency; c2000, p.518.
20. Kent DC, Park R. Flexural members with confined concrete, ASCE Journal of the Structural Division, 1971;97(7):1969-1990.